

都市域における氾濫解析システムの適用と 下水道流入モデルに関する検討

APPLICATION OF INUNDATION ANALYSIS SYSTEM IN URBAN AREA AND EXAMINATION OF INFLOW MODEL FOR SEWER SYSTEM

松尾直規¹・武田 誠²

Naoki MATSUO and Makoto TAKEDA

¹フェロー 工博 中部大学教授 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

²正会員 博士(工) 中部大学助教授 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

The measure for inundation due to interior runoff must be examined significantly, so that the actual works need not only the detailed simulation model for inundation analysis but also the method for data making and demonstration of simulation results. In this study, the inundation analysis system in urban area is applied in order to treat the complex water behaviors in overland area, road, sewer pipe, rivers. This system consists of detailed inundation analysis subsystem, data making subsystem and demonstration subsystem. Developed simulation model is applied for the analysis of inundation in large urban area due to Tokai heavy rain. From this study, the problem of the inflow model for sewer system is shown, so that the modification method of inflow model for sewer system is examined and its validity is discussed.

Key Words : *Inundation analysis system, Inflow model for sewer system, numerical analysis, Urban area*

1. はじめに

2004年の新潟・福島豪雨災害や福井豪雨災害, 台風21号による三重県宮川流域での災害, 台風23号による円山川流域, 由良川流域での災害, さらに, 2005年の台風14号による宮崎県などの災害など, 近年わが国では多くの水災を受けている。さらに, 人口が集中している大都市でも局所的な集中豪雨に伴う水災が発生している。都市では, アスファルト舗装に伴う浸透水の低減や表面水の集中, 内水排除不良などにより浸水が生じ, 地下施設も多いため水災に対する安全度が低い場合が多く, 水災対策は都市整備において非常に重要な課題となっている。

近年, 様々な研究により, 多くの氾濫解析モデルが提案されている。それぞれの研究対象の違いから, 提案されているモデルの特性も異なっているが, 都市型水害を考える上では, 下水道システムや小河川, 道路による水の挙動を適切に表現するモデルが必要となる。いくつかの研究から, 上記の課題に対処できるモデルを挙げてみれば, 関根ら¹⁾は, 氾濫水, 下水道水のモデル化を考慮し地下街への浸水過程を数値解析で表現しており, また,

相良ら²⁾は下水道システムのモデル化を行い, 氾濫水と下水道水との詳細な検討を行っているが, 両者とも比較的狭い範囲を対象にしている。さらに, 川池ら³⁾, 戸田ら⁴⁾は, それぞれ寝屋川市, 京都市と解析範囲は大きいものの, 氾濫格子が比較的大きく下水道流の噴出しや落ち込みなどの複雑な水理現象の表現がなされていない。したがって, 広域でかつ都市内の複雑な水輸送の表現を考慮した解析事例は報告されていない。

実際の治水対策を検討するためには, 詳細かつ複雑な水理特性および解析条件を考慮する必要があるが, そのためのデータ整理には莫大な時間と費用がかかるのが一般的である。仮に, その作業が簡単化できるならば, 氾濫解析を実施する問題点の多くが解決できる。したがって, 詳細な氾濫解析の実務への適用を行う場合には, そういったデータ整備に関する問題を解決する必要がある。著者らは上記の課題を解決するために, 鹿島建設と共同で下水道システムや河川, 小河川, 道路などの都市内の複雑な水の挙動を適切に表現する氾濫解析モデルを構築するとともに, データ整備および解析結果処理も含めた解析システム「都市型水害予測解析システム」を構築している⁵⁾。本解析システムは, 氾濫解析サブシステムが,

氾濫域と下水道との水輸送や、ポンプ排水、雨水吐による河川と下水道との水輸送、堤防を挟んだ河川と氾濫域との水輸送など詳細な水の挙動をモデル化していること、データ整備サブシステムがデータを収集した後のデータの修正および解析に必要なデータの作成機能を有していることが特徴として挙げられる。

本報では、上述の氾濫解析システムを多大かつ複雑な水路系を構成する大都市での氾濫現象に適用し、その妥当性ならびに有用性を検討している。特に氾濫域から下水道への落ち込みに関するモデル化の問題点を提示し、ひとつの解決法を提案している。

2. 都市型水害予測解析システム

都市型水害予測解析システムは、氾濫解析サブシステム、データ整備サブシステム、結果処理サブシステムから構成されている。以下にそれぞれの概要を示す。

(1) 氾濫解析サブシステム

本解析サブシステムは、河川、氾濫域、下水道、小河川（排水路）における水の流動およびそれらの間の水輸送をモデル化している。ただし、小河川の取り扱い後は述べる適用例に用いていないため省略する。

a) 河川

河川の解析では、連続式とエネルギー方程式を用いる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} - g \sin \theta + \frac{gn^2 u |u|}{R^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

ここで、 A は断面積、 Q は流量、 q は横流入量、 u は流速（ $=Q/A$ ）、 h は水深、 g は重力加速度、 θ は河床勾配、 n はマンニングの粗度係数、 R は径深、 x は距離、 t は時間である。

b) 氾濫域

氾濫域の解析では、建物占有率および透過率を考慮した以下の浅水方程式を用いる。

$$(1-\sigma) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \beta M}{\partial x} + \frac{\partial \beta N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial u M}{\partial x} + \frac{\partial v M}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial u N}{\partial x} + \frac{\partial v N}{\partial y} & = -gh \frac{\partial H}{\partial y} \quad (5) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho} \end{aligned}$$

ここで、 u, v はそれぞれ x, y 方向の流速、 h は水深、 M, N はそれぞれ x, y 方向のフラックス（ $M = uh$,

$N = vh$ ）、 H は水位、 τ_{bx}, τ_{by} はそれぞれ x, y 方向の底面のせん断応力、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ はそれぞれ x, y 方向の渦動粘性係数、 σ は氾濫格子に対応する建物占有率、 β は透過率であり建物占有率を用いて $\sqrt{1-\sigma}$ であり、 x, y は平面の座標、 t は時間である。

底面のせん断応力は、マンニングの粗度係数を用いて、以下の式で表される。

$$\tau_{bx} = \rho g n^2 M \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (6)$$

$$\tau_{by} = \rho g n^2 N \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (7)$$

c) 下水道システム

下水道の解析では、下水管渠とマンホール部における水の挙動をそれぞれモデル化しており、マンホール部で氾濫格子との水の受け渡しを行っている。

下水管内の解析では、(1)式および(2)式を用いており、スロットモデルにより、満管流れおよび開水路流れを同様に扱っている。スロット幅の決定には、 gA_s/C^2 （ g は重力加速度、 A_s は断面積、 C は波速であり、20m/sを仮定）を用いている。

マンホール部の水位は、次の連続式で求めている。

$$A_m \frac{\partial H}{\partial t} = \sum Q + Q_{in} - Q_{out} \quad (8)$$

ここに、 A_m はマンホールの面積（水位が地盤高よりも高い場合は氾濫格子の面積）、 H は水位、 $\sum Q$ はマンホールにつながっている下水管からの正味の流入流量、 Q_{in} は氾濫格子からの流入流量（ $KLh\sqrt{gh}$ ： K は流量係数（0.544⁹⁾）、 L はマンホールの円周、 h は浸水深）、 Q_{out} はポンプが存在する場合の流出流量である。

d) 各モデル間での水輸送

マンホール部では、氾濫域とマンホール部との水の受け渡しを行い、マンホール内の水位が地盤高よりも低ければ、c)で示した落ち込み流量をマンホール部へ受け渡し、マンホール部の水位が地盤高よりも高い場合は、落ち込み流量を考慮せずに水量の増減を計算し、その値を用いて氾濫格子の浸水深を補正している。

河川と氾濫域の間の堤防では、以下の本間の越流公式を用いて、堤防上の越流現象をモデル化している。

$$Q = \mu L h_1 \sqrt{2gh_1} \quad h_2/h_1 \leq 2/3 \quad (9)$$

$$Q = \mu' L h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad h_2/h_1 > 2/3$$

ここで、 $h_1 = H_r - H_o$ 、 $h_2 = H_f - H_o$ 、 H_r は河川水位、 H_f は堤内地の水位、 H_o は堤防の天端高、 L ：格子に存在する堤防長、 μ, μ' は流量係数であり、それぞれ0.35、0.91、 g は重力加速度である。なお、上記の式は河川水が堤内地水位よりも高い場合のものであるが、逆の場合は H_r と H_f を入れ替えて用いている。

下水道と河川との水輸送として、ポンプおよび雨水吐による排水を考慮している。ポンプ排水による流量

を放出先の河川断面に流出させている。また、雨水吐箇所では、下水道管渠における運動方程式中の重力項を対応する河川水位を用いて計算することで流速および流量を求めており、その値を下水道および河川断面の連続式で用いている。

e) 数値解析法

本解析モデルでは、数値解析法として差分法の陽的解法を適用している。

(2) データ整備サブシステム

2.1の氾濫解析サブシステムが必要とする情報を表-1に示す。構築したデータ整備サブシステムはこれらのデータを概ね自動的に整備することが可能である。その代表的な特徴は以下の3つである。

a) 解析データの自動作成：河川や海域の境界などの地形情報や地盤高、建物形状のデータが入手できれば、それらを用いて氾濫格子に対応するInformation データ（計算格子、非計算格子、河川格子を示すデータ）、地盤高、格子に対する建物占有率（粗度係数や透過率に与する）を自動的に算出できる。

b) 下水道データの修正：下水道データは、数値化されたものが少なく、仮に数値化されていたとしても使用頻度が低いものはデータに間違いが多い。そこで、本サブシステムによりマンホールと下水道との関連、マンホール底面高と地盤高、下水道水路床高との関連、土被り厚との関連からデータを評価し、不都合な部分を図化し、簡単に修正することができる。

c) 氾濫格子と河川格子の関連データの作成：氾濫解析サブシステムはデカルト座標の氾濫解析法を適用しており、河川の解析は一次元解析法を適用している。したがって、堤防からの越流を考慮する場合、どの河川断面からどの氾濫格子に越流量を受け渡すかを定義する必要がある。このような河川と氾濫格子との接続情報と氾濫格子中に在る堤防長を自動的に作成することができる。

(3) 解析結果表示システム

効率よく解析結果の図化を行うための処理システムが存在し、浸水深分布図、河道水位図、下水道内流況図などが容易に表示できる。

3. 都市河川流域への適用

(1) 計算条件

都市型水害予測解析システムをA川流域へ適用し、各種治水対策の検討に用いるための予備段階として、東海豪雨における浸水状況を再現し、モデルの妥当性評価を行った。計算領域を図-1に、計算条件を表-2に示す。

表-1 氾濫解析サブシステムに必要な情報

河川	境界条件(水位、流量) 河川平面形状、断面形状 河川格子と氾濫格子の関連
氾濫域	境界条件(降雨) 解析範囲(解析格子) 地盤高 格子の建物占有率 堤防および盛土の平面形状、天端高
下水道	下水道管の位置(接続するマンホールとの対応) 下水道管の大きさ マンホールに接続する箇所の下水道の管底高 マンホールの位置、大きさ、底面高 ポンプ排水所の位置と対応する河川断面 ポンプの最大排水量 余水吐の位置と対応する河川断面 余水吐の底面高と大きさ 貯水槽の位置と容量

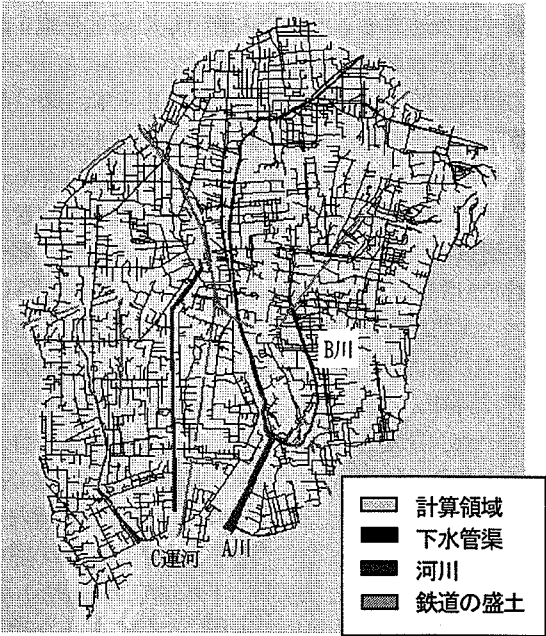


図-1 計算領域

表-2 計算条件

計算格子	30m×30m(格子数141,317)
地盤高	下水道人孔(マンホール)標高データを基本
河川	A川、B川、C運河、D川
下水道	マンホール:18,595、管渠:19,380
ポンプ	下水道ポンプ26箇所、その他ポンプ3箇所
貯留施設	雨水調整池15、雨水滞水池2、調整池1
地下鉄浸水	2箇所(80,000m ³ と11,000m ³)
堤防・盛土	鉄道などの盛土を考慮
粗度係数	地表面:0.067、下水道0.013、河川:0.020 21箇所にティーセン分割した10分間降雨を各格子に与える。
降雨量	
水位境界条件	A川河口にE港実績潮位を与える。
流量境界条件	D川、C運河はポンプによる排水
計算時間	2000年9月11日2時～9月12日7時
計算時間間隔	氾濫計算:0.1秒、下水道システム:0.05秒

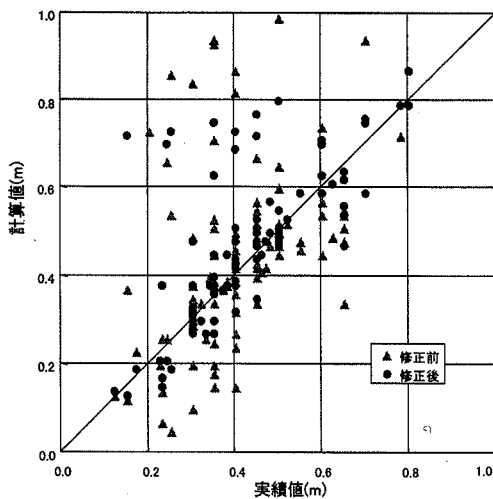


図-2 浸水深の計算値と実績値の比較

(2) 計算結果および考察

図-2に後述する下水道流入モデルの修正を施す前の計算結果と浸水深の実績との比較を、図-3にA川とその支川のB川における水位実績との比較を示す。図-2から、計算値（修正前）が実績値よりも高い値を示していることが分かる。実際の浸水深を観測することは非常に難しく、ある程度の誤差を含むものとして見なすべきであり、その観点からは妥当な結果ともみてとれるが、図-3に示されたA川河口から10.1km地点の水位の結果からは、計算値と実測値との間に最大で1m以上の差が生じており、モデルの修正が必要であることが分かる。本計算の境界条件は降雨と河川水位および河川流量であり、降雨はティーセン分割された21の領域に10分間降雨を与えていることから、比較的精度の高い降雨条件の設定であると考えている。降った雨はマンホールから下水道内へ落ち込み、河川へ流出していくこととなるが、その際の落ち込み流量のモデル化（以下、下水道流入モデル）が、氾濫域および下水道・河川の解析における新たな境界条件となる。仮に落ち込み流量が実際に比べて大きい場合には、ある場所では浸水が生じず、河川水位が高くなる。一方、その影響を受けて別の場所では雨水が排水できず浸水が生じることになり、河川水位と浸水深の空間分布に実際との不一致が生じる。したがって、下水道が発達した都市域における氾濫を対象とする場合には、適切な下水道流入モデルの設定が非常に重要な課題となる。

4. 下水道流入モデルに関する検討

実際の氾濫水は複雑な経路を辿って下水道システムへ流入するが、本研究では、実用性を考慮し、氾濫域と下水道システムの水の流入・流出現象をマンホールで受け持たせる簡便な方法を採用している。

マンホール部の解析では、水位が地盤高を越えた場合

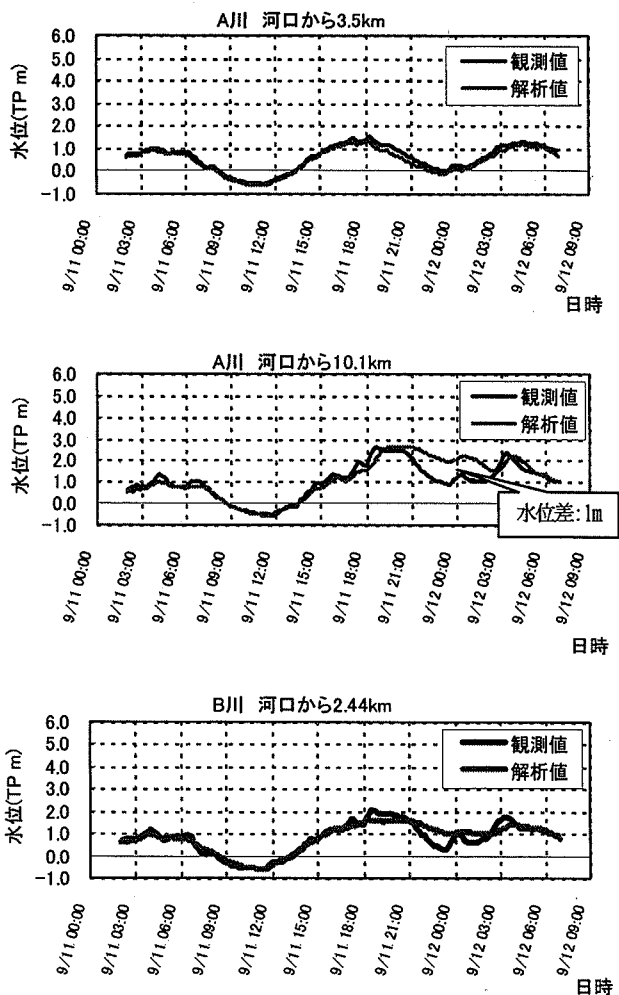


図-3 河川水位

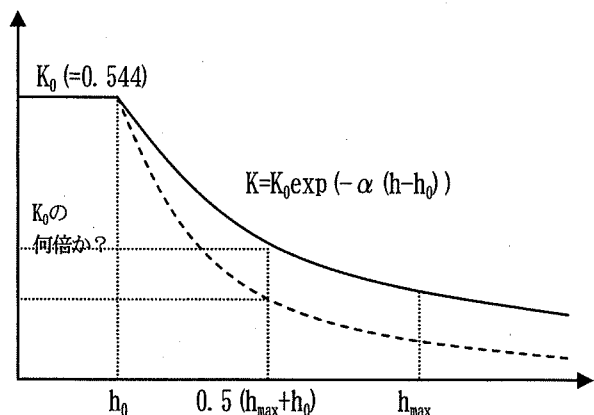


図-4 流量係数のモデル化

に、マンホールの受け持つ面積を氾濫格子の面積に置き換えて計算を行っている。マンホールから水が噴出し浸水する場合は実際と矛盾しないと考えられるが、マンホールに水が流入する場合には、氾濫格子の面積がマンホールの面積よりも多大であるため平均水位の低下が遅くなり高い水位が維持され、多量の水がマンホールおよび下水管の中に流入している可能性がある。また、マンホールへ流入する落ち込み流量は、2. (1) で示してい

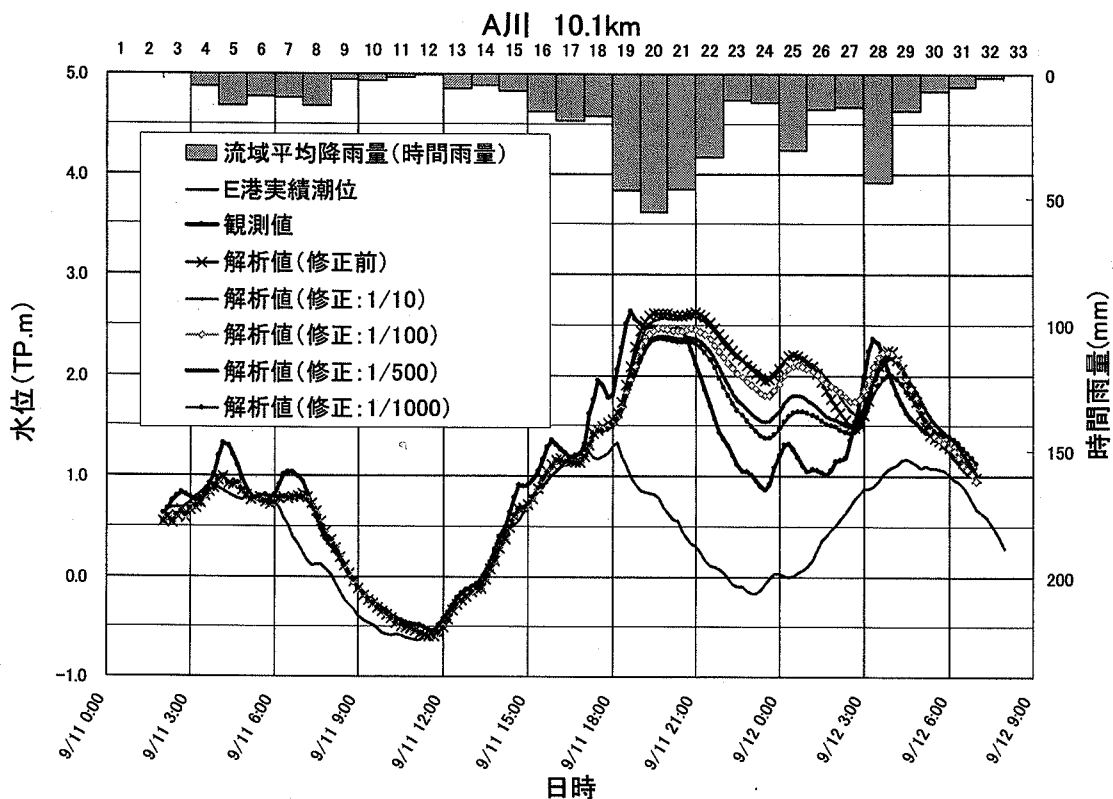


図-5 河川水位

るように、越流公式を用いている。しかし、浸水深が大きい場合に越流公式をそのまま用いると、実際よりも多大な水量を下水道内へ流入させる可能性がある。

これらの課題に対する解決策として、以下のようなモデル化を試みた。まず、落ち込み流量の算定に用いる流量係数を一定とせず、図-4のように水深に応じて低減させ、以下の式で求めた。

$$K = K_0 \exp(-\alpha(h - h_0)) \quad (10)$$

これは、浸水深が大きい場合には越流公式で算出される流量よりも少ない流量が落ち込むことを想定している。ただし、図-3に示すように、浸水の初期などはこれまでの方法で十分にA川の水位を表現していることから、式中の h_0 は既存の流量係数が適用できる限界の水深とし、河川水位が比較的一致している初期の浸水深の解析結果を参考に0.1mと定めた。また、 α の設定には、平均的な浸水深を0.8mと定めて、 $0.5(h_{\max} + h_0)$ における流量係数 K が K_0 の何倍であるかを目安として定めた。

さらに、マンホールの水位が地盤高より高く、かつマンホールから下水道を通じて流出する流量よりも落ち込み流量が小さい場合には、氾濫域と下水道内の水位が分断されるものと想定し、マンホール内の連続式における1ステップ前の水深を“地盤高から底面に相当する水深”に置き換え、落ち込み流量を考慮して計算を行った。上記のモデル化の下で、1/10、1/100、1/500、1/1000に対応する α の値を用いて解析を行った。解析結果の一例

として、A川の河口から10.1kmの水位を図-5に示す。本図から1/10～1/100の範囲では解析結果に大きな差は生じていないが、1/500よりも小さくした場合には、水位の計算結果が実測値に近づいていることがわかる。しかし、1/1000の場合には、水位の低減は十分に表現しているものの、9月12日3時の水位の増加を十分に表現していない。したがって、本解析結果の場合、1/500に対応する α の場合が現実的な水理現象を十分に再現できているとみなした。また、浸水深の計算値(1/500の場合)と実績値の比較(修正後)を図-2に示す。図-2からもモデルの修正を加えた計算結果が実績値に近くなっていることが分かり、浸水深の分布からも解析モデルの修正が適切に行われたことが分かる。図-6には、下水道流入モデルの修正前と修正後の浸水深の分布を示す。本図から、修正前のモデルでは9月11日24時に現れなかったE市北東部の浸水(図中点線の部分)などが、修正後のモデルでは現れていることが分かる。この地域は浸水被害が発生していた地域であることから、修正後の結果が実際と一致する。下水道流入モデルを修正した場合、落ち込み流量は修正前よりも減少することから、特に上流域に位置する地盤の低い箇所新たな浸水が見られた。一方、河川水位は修正前より低下しているため、下水道の流下能力が増した地域で浸水深が低減した。修正後の解析結果は修正前よりも実測値と一致しており、下水道流入モデルの修正により総合的な解析精度の向上が図られたものと考えられる。



下水道流入モデル修正前

下水道流入モデル修正後

図-6 浸水深の空間分布 (2000. 9. 11 24:00)

おわりに

本研究では、都市型水害予測システムの概要を示し、そのE市A川流域へ適用を試みた。その中で、下水道流入モデルの課題と重要性を指摘し、モデル改善の一手法を提案した。得られた成果をまとめれば以下のようなものである。

1) 都市型水害予測解析システムの概要を示し、解析システムには、氾濫域、下水道システム、河川における複雑な水理的挙動が詳細に解析できること、解析を行うためのデータ整備サブシステムを有していることなどの有益な特徴があることを示した。

2) 解析システムの実務への適用の第一段階として、E市A川流域を対象に東海豪雨による浸水の再現計算を行った。その中で、特に下水道流入モデルの課題、重要性を指摘した。

3) 下水道流入モデルとして、落ち込み流量算定に用いられる流量係数を水深の関数と定義し、低減係数 α の値を試行錯誤的に変化させ解析を実施した。その結果、目安として $0.5(h_{\max}+h_0)$ の K_a が K_0 (0.544)の1/500の場合に、計算されたA川の河川水位が実測値と十分適合する結果となった。また、その場合の浸水深の分布をみても、実際の状況を再現した結果が得られた。したがって、対象とした流域の場合、1/500を目安として求めた下水道流入モデルが妥当であるといえる。

4) 本検討から、氾濫域、下水道、河川を統合して解析する場合には、下水道流入モデルが非常に重要であることが示され、適切な下水道流入モデルを用いることで、

氾濫域、河川などの総合的な解析結果の精度向上につながることを示された。

最後に本研究は平成17年度科学研究費補助金(基盤研究(C))「都市における複合型氾濫解析モデルの高度化とその水災対策への応用に関する研究」の補助を受けたものであることを記しておく。

参考文献

- 1) 関根正人・河上展久：都市における内水氾濫と地下街浸水の被害予測に関わる数値解析，水工学論文集，第47巻，pp. 889-894，2003。
- 2) 相良亮輔・錦織俊之・井上和也・戸田圭一：校線下水道を考慮した市街地氾濫解析，水工学論文集，第48巻，pp. 589-594，2004。
- 3) 川池健司・井上和也・戸田圭一・野口正人：寝屋川流域を対象とした氾濫解析モデルの高度化，水工学論文集，第47巻，pp. 919-924，2003。
- 4) 戸田圭一・井上和也・村瀬賢・市川温・横尾英男：豪雨による京都市域の氾濫解析，水工学論文集，第44巻，pp. 479-484，2000。
- 5) M.Takeda, N. Matsuo, S. Hirashima, Y. Hirayama, M. Tanaka, K.Inoue: The development of inundation analysis in urban area, MPMD2005, pp.125-130.2005。
- 6) 井上和也：開水路非定常流の数値解析法とその水工学への応用に関する研究，京都大学学位論文，pp172-177，1986。

(2006. 4. 6 受付)