

都市内水氾濫解析における複雑な下水道管網の モデル化に関する検討

STUDY ON THE MODELING OF THE COMPLEX SEWER PIPE NETWORK IN
URBAN INUNDATION ANALYSIS DUE TO INTERIOR RUNOFF

武田 誠¹・山中威士²・霧生元道³・松尾直規⁴

Makoto TAKEDA, Takeshi YAMANAKA, Motomichi KIRYU and Naoki MATSUO

¹正会員 博士(工) 中部大学准教授 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 三井共同建設コンサルタント株式会社 (〒464-0850 愛知県名古屋市千種区今池5丁目24番32)

³非会員 三井共同建設コンサルタント株式会社 (〒464-0850 愛知県名古屋市千種区今池5丁目24番32)

⁴フェロー 工学博士 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)

The analysis models on inundation due to interior runoff in urban area must be considered the detailed water behaviors in sewer system. Though the detailed inundation analysis model with sewer system model is developed recently, the effect of very fine sewer pipe and complex sewer system facilities, e.g. existence of gate in manhole, are not treated in analysis model. This study examines the modeling of these two points for numerical simulation. First, the inflow discharge from overland to manhole set by using sewerage capacity as 50mm/h and the region set by using fine sewer pipe network which are not used in analysis. Secondly, the manhole with gate is separate two regions for numerical analysis treatment of existence of gate in manhole. These modeling are examined by using states of inundation water depth, water level in river and pump discharge. It is found that the analysis results obtained by developed inundation analysis model are good agreement with observed results.

Key Words : *Inundation analysis method, sewer pipe network, Inundation due to interior runoff*

1. はじめに

近年, 日本の各地で洪水, 豪雨による水災が発生している。2008年には, 7月28日の兵庫県神戸市の都賀川や, 8月5日の東京都豊島区雑司が谷の下水道工事現場において, 人的被害が生じている。また, 同年8月26日~31日には, 平成20年8月末豪雨により, 全国で局地的浸水被害が生じた。特に, 愛知県はその被害が大きく, 岡崎市で146.5mm/h, 一宮市で120mm/hなどの観測史上一位の降水量を記録し, 死者2名, 重軽傷者2名, 床上浸水約2,200世帯, 床下浸水9300世帯におよぶ甚大な被害が生じた¹⁾。これらは, 突如として生じた豪雨が主な原因であり, 「ゲリラ豪雨」の名称で, その怖さと共に社会的認知を得ている。

このような局地的かつ激しい豪雨に対しては, 特に, 小さな流域面積を持ち, 流下能力が非常に小さい河川(二級河川など)では急激かつ大きな増水が生じるため, 注意が必要であろう。それに加えて, 雨水排除不良から引き起こされる内水氾濫の対策も非常に重要となる。

都市の内水氾濫対策として, 下水道管および排水ポンプの整備・増築, 貯留施設の建設などが考えられる。これらを検討するためには, 雨水排水に関する都市機能(特に, 下水道システム)を十分に表現できる氾濫解析モデルが不可欠である。著者らは, 鹿島建設および中部大学が共同で開発している「都市型水害予測解析システム」²⁾を用い, N市領域を対象に解析を進めてきた。その中で, 次の2点が課題として浮かび上がってきた。

①都市域から下水道システムへの水の受け渡しは, マンホール部で行っている。管径600mm以上の多くの下水道管とそれに対応するマンホールを用いて解析を行っているが, 解析上マンホールが存在しない場所にも, 実際には側溝があり小さな下水道管が配置され幹線下水道へとつながっている。解析では, そのような細かな下水道システムの影響が表現できていない。

②マンホール内は一つの空洞としてモデル化してきた。しかし, 実際にはマンホールの中にも複雑な水の輸送形態があり, 水量が増え水位が堰高を超えた場合にマンホール部の下部へと流れ, 別の下水道管へつながる

ものもある。このような詳細なマンホール内の水の輸送が表現できていない。

本研究では、上の2点に焦点を絞り、それぞれのモデル化とそれらの解析結果に与える影響を考察した。なお、これまでも、都市域の氾濫解析の高度化は多くの研究者により検討されている。特に、下水道システムを考慮した都市域の内水氾濫解析に焦点を絞れば、戸田ら³⁾、関根ら⁴⁾、川池ら⁵⁾によって詳細なモデリングおよび浸水・排水過程の検討が実施されている。ただし、これらの研究と比べれば、対象としているスケール（計算領域）が大きいこと、その中で下水道システムのモデル化に関する高度化を検討していることに特徴がある。

2. 氾濫解析法および計算条件

本研究では、鹿島建設および中部大学が共同で開発している「都市型水害予測解析システム」²⁾を基礎としている。本システムは、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、河川、小河川、氾濫域、下水道システムにおける水理現象をそれぞれ適切にモデル化し、解析のためのデータ作成が自動的に行えるよう、さらに、効果的なグラフィック表示が施せるよう配慮されている。

ここでは、氾濫域からマンホールへの水の落ち込み・噴き出しとマンホールおよび下水道管での水の輸送が焦点となるため、それに関するモデル化のみを示す。詳細は、松尾ら⁶⁾を参考にさせていただきたい。

(1) 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。

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh\frac{\partial H}{\partial x} \quad (2)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{hx}}{\rho}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh\frac{\partial H}{\partial y} \quad (3)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{hy}}{\rho}$$

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_{hx}, τ_{hy} 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。

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

$$\tau_{by} = \rho g n^2 N \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (5)$$

(2) 下水道システム

下水道管の解析では、以下の連続式とエネルギー方程式を用いる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} - g \sin \theta + \frac{g n^2 u |u|}{R^{4/3}} = 0 \quad (7)$$

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。

解析には、スロットモデルを用い、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、 $g A_s / C^2$ (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道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、 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。

ここで、流量係数 K については、松尾ら⁶⁾の検討から、

$$K = K_0 \exp(-\alpha(h - h_0)) \quad (9)$$

を用いている。ここで、 K_0 は0.544、 h_0 は0.1m、 α は7.71である。 α の値は、東海豪雨時の河川水位、浸水深、浸水域の観点から観測値に合うように設定されている。

(3) マンホール部における水の受け渡し

マンホール内の水位が地盤高よりも低い場合は、2. (2) で示した落ち込み流量をマンホール部の連続式へ受け渡している。仮に、マンホールへ流入する水量がマンホール内の許容容積を超えた場合には、超えた水量を氾濫域の連続式で考慮し、マンホール部の水位は氾濫格子で得られた水位と同じと改めている。一方、マンホール部の水位が地盤高よりも高い場合は、まず、2. (2) で示した落ち込み流量 (Q_1) と、マンホールに隣接する下水道管の流量から得られる正味の排出流量 ($Q_2 = -\sum Q$) を計算し、 $Q_1 < Q_2$ の場合には、マンホール内と氾濫域の水が分断されると仮定して、1ステップ前のマンホールの

水位を地盤高に置き換えて、 Q_1 を考慮した連続式を計算する。その場合、氾濫格子では Q_1 を考慮した連続式を計算し、得られた水位はマンホールの水位と改めない。一方、 $Q_1 > Q_2$ の場合、 Q_1 を考慮せずにマンホールの連続式を計算し、水量の変化量を氾濫域の連続式で考慮し、得られた氾濫格子の水位をマンホール部の水位と改めている。

4) 計算条件

本研究では、N市領域における東海豪雨による浸水を対象とする。計算領域および考慮した施設を図-1および表-1に示す。計算期間は2000年12月11日2時～12月12日7時までであり、それに対応する降雨を与えている。なお、本研究の場合、建物占有率はゼロとして取り扱った。

3. 下水道システムへの流入に関するモデル化

(1) モデル化の概要

「都市型水害予測解析システム」（以後、旧モデルとする）では、マンホール部で氾濫域と下水道システムへの水の輸送を取り扱っている。すべての下水道管およびマンホールとそれにつながる側溝を取り上げることは、計算時間および計算容量の観点から現実的ではない。細かい排水過程が表現されていないモデル（旧モデル）では、マンホールが無い格子の水は地盤高の低い格子へと流れ、マンホールが存在する箇所において下水道へと流入することとなるが、その場合、浸水深が過大に現れることも考えられる。そこで、旧モデルの2. (2) で示した下水道への流入に関する取扱いを下記のように改めた。なお、噴き出しなどの氾濫域とマンホール部の水のやり取りに関しては従来どおりの取り扱いであり、落ち込み流量が発生する格子とその値の設定が異なる。

ここでは、「N市の下水道システムが時間雨量50mm/hに対応している」ことを適用し、一つのマンホールに流れ込む領域を予め求めておき、その領域から50mm/hに対応する水量（“50mm/h×格子の面積×計算時間間隔”（ V_0 ）の領域における総和（ V_T ）をマンホールへ輸送させた。ただし、格子に V_0 分の水量が無い場合には存在する水量を対象とし、マンホールに V_T 分の容積が無い場合には、許容できるマンホールの容積分に相当する水量を（その場合には、格子からの水量を減少させて）受け渡した。すなわち、マンホールが無い格子からも送り先のマンホールが満杯にならなければ、最大で50mm/hに相当する水量を受け渡し、マンホールが満杯になれば、雨水は排出できずに、下水道へは輸送されないこととなる。なお、マンホールに流れ込む領域の設定は、解析に使用していない小さな管径の下水道データを用い、各格子の中央座標に対して最も近い距離のマンホールを求め、そのマンホールを基点として流下方向に接続する下水管およびマンホールを追跡し、解析で使用しているマンホール番号までつなげることで、計算格子

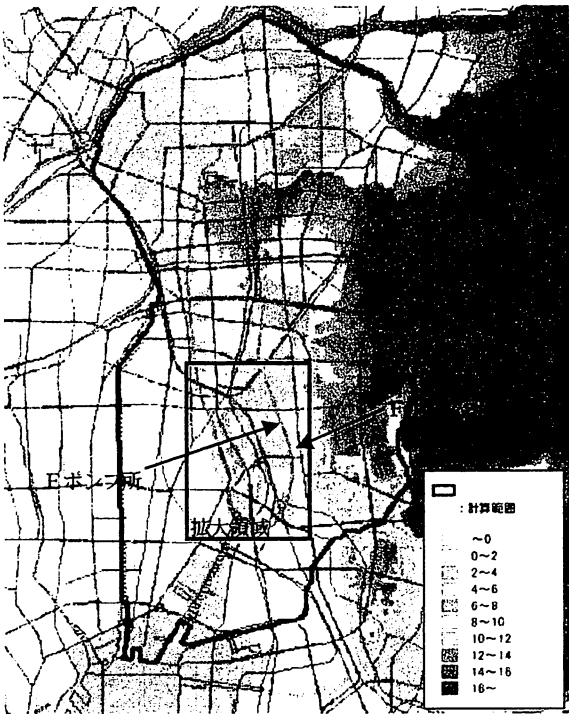


図-1 計算領域

表-1 計算条件

計算格子	30m×30m(格子数93,633)
地盤高	数値地図50mメッシュ(標高)国土地理院 下水道人孔(マンホール)標本データ
河川	A川、B川、C運河、D河川
下水道	マンホール:14,894、管渠:15,625
ポンプ	内水排除ポンプ17箇所、その他ポンプ3箇所
貯留施設	12箇所
地下鉄浸水	2箇所(80,000m ³ 、11,000m ³)
堤防・盛土	鉄道等の盛土を考慮
粗度係数	地表面:0.067、下水道管渠:0.013、河川0.030
降雨量	21箇所の観測所よりティーセン分割した10分間実測降雨を各格子に与える。
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	C運河、D川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、下水道計算:0.05秒

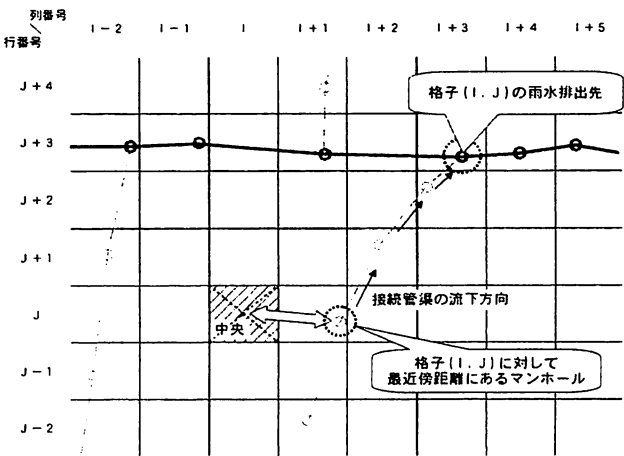


図-2 マンホールに対応する氾濫格子の設定

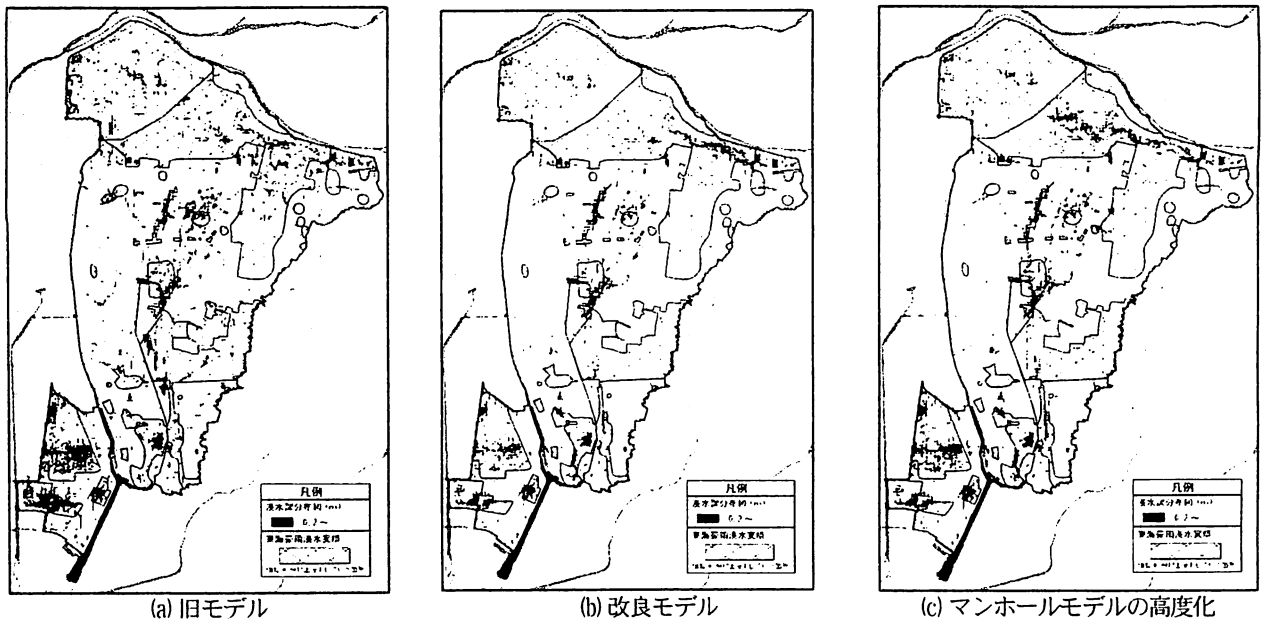


図-3 最大浸水深の分布

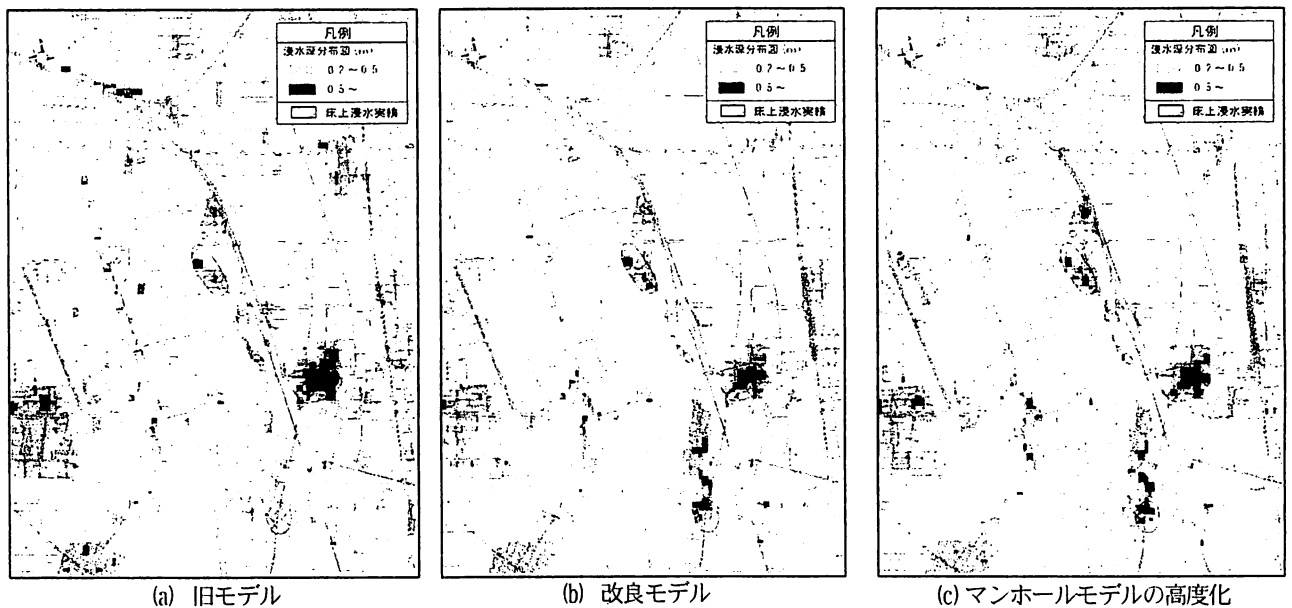


図-4 最大浸水深の分布 (拡大領域)

とマンホールの対応を設定した。

(2) 計算結果および考察

図-3に旧モデルと改良モデルにおける0.2m以上の最大浸水深の分布を示す。本図から、両者には大きな差が見られないが、改良モデルの方が浸水域が小さく固まって現れている。実績の浸水域と異なるようであるが、実績の浸水域には不確かさが伴うこと、旧モデルの実績に浸水が見られない箇所でも浸水が現れている状況が幾分解消されていることから、良い結果と考えている。また、図-4は図-3で示した部分を拡大して最大浸水深の分布を示しており、ここでは床上浸水があった地域も同時に記載している。床上浸水があった場所は確実に浸水深が大きい箇所であり、旧モデルよりも改良モデルの方が浸水深が大きく現れていることから、改良モデルの妥当性が示された。

4. マンホール内の水輸送モデルの高度化

(1) モデル化の概要

下水道管は複雑に構成されており、図-5に示すように、マンホール内に余水吐が存在する事例も多い。このような場合、余水吐室を考慮しないと、下水道管を通じて流入した水は、マンホール部の最も低い箇所に位置する下水道管（多くの場合、幹線下水道管が貯留施設へ向かう下水道管）を伝わって流れることとなる。しかし、実際は堰高を越えた水位が現れてから初めて最下部に位置する下水道管へと流れるため、実際とは異なる状況となる。本研究で対象としたN市の領域にも、このような複雑なマンホールが多数あり、これらを考慮しない場合には、解析結果に実際との差が現れると考えられる。そこで、本研究では、図-5のように余水吐室のあるマンホールを2つに分け、その間を仮の管路（断面は越流部の断面を

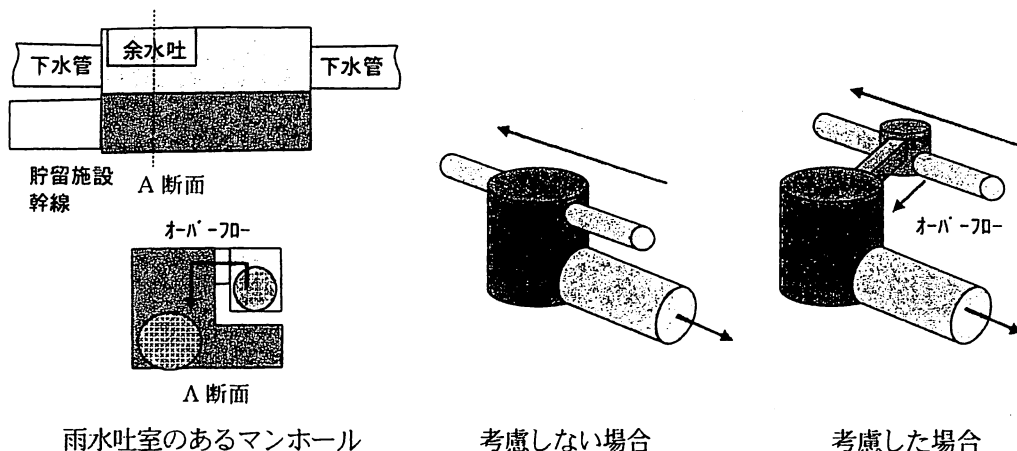


図-5 マンホール内の水輸送モデルの高度化

設定、長さは1mを仮定) でつなげ、約300個の余水吐、マンホールの高さや形状などを個々にモデル化し、下水道データを改良することで、複雑なマンホール内の水理現象をモデル化し、マンホールモデルの高度化を行った。

(2) 計算結果および考察

前述した図-3および図-4にマンホールモデルの高度化による最大浸水深の分布を(c)として示す。まず、全域の最大浸水深の分布を見れば、(b)に比べて対象領域の北側で大きな違いが現れている。この領域には多数マンホールモデルの高度化が行われており、その結果が現れているものと考えられる。黒丸で示した部分には、地下に大径の下水道(大幸幹線)が存在する。(b)では早くから大幸幹線に水が浸入するため、その上流域で下水道へ流下せず浸水が生じているのに対し、マンホールの高度化を行ったことで、下水道への流下能力が低下し下流側にも浸水が現れている。また、図-4の床上浸水が生じた箇所を見れば、マンホールモデルを高度化した方が浸水深が大きくなっており、実際に近い結果となっている。

つぎに、A川の河川水位を図-6に示す。本図から、河川水位に関しては、マンホールの高度化の影響が明らかに現れており、観測値に近い水位変化を示している。また、本図には、旧モデルの結果も併せて示しているが、旧モデルの結果よりも、改良モデルの結果が実績に近いことが示されており、さらに、マンホールモデルの高度化を施した方が実際に近い値を示している。

図-7にポンプの排出流量の時間変化を示す。ポンプ場では、流入してきた水を河川に排出し、上限値の流量(水量としては、最大流量×計算時間間隔)のみが決められている。すなわち、上限値以下の水が流入した場合には、そのまま河川へ排出され、上限値以上の水が流入した場合には、上限値の流量が排出される。図-7には、本研究で取り扱った3つの解析結果が示されているが、すべて同様の傾向を示しており、実績とも類似していることから、すべての解析において、管路内を適切に水が流れ、ポンプ場に集積していることが分かる。その中で

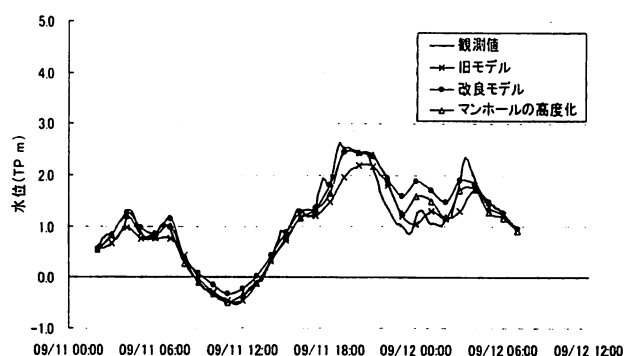
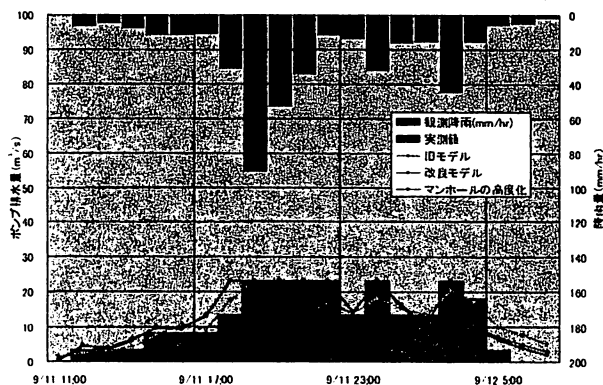
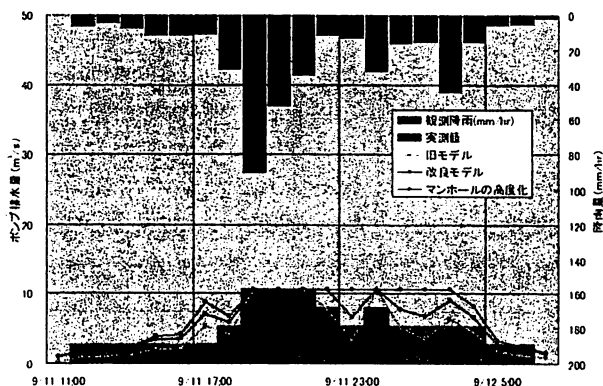


図-6 河川水位 (A川)



Eポンプ場



Fポンプ場

図-7 ポンプの排出流量

も、マンホールモデルを高度化したものは、特に降雨に対する感度が良く、実際の値と良く一致している。

図-8に、改良モデルとマンホールの高度化のモデルにおける、余水吐室を有するマンホールと隣接する幹線下水道の9月11日10時と同日17時の水位を示す。9月11日10時には、改良モデルでは既に幹線下水道内に水位が現れているが、マンホールの高度化を施したモデルでは、堰の効果を受けて水位が現れていない。9月11日17時には共に幹線下水道内水位が現れているが、両者に差が現れている。定量的な妥当性評価は困難であるが、マンホール部の余水吐室の効果としては定性的に妥当であること、河川水位の値と変化が概ね一致したことから、マンホール部の高度化を施したモデルが妥当であるといえる。

5. おわりに

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

1) 下水道モデルを有する氾濫解析モデルにおいて、マンホール部で氾濫域と下水道域との水の受け渡しを行う場合には、解析に取り扱わなかった下水道システム（詳細な下水道管、マンホールおよび側溝など）の影響が反映されない。この点について、対象としたN市では、「時間雨量50mm/hに対応する」ことを目指し下水道整備を行っていることから、この値を解析に用い、氾濫域からマンホールへの落ち込み流量のモデル化を行った。その結果、全域の浸水状況には大きな違いは現れなかったが、改良モデルでは浸水域がばらつかずに現れ、実際に床上浸水が生じている箇所で旧モデルよりも改良モデルの方が大きな浸水深を示した。さらに、河川水位の観点からも、改良モデルの妥当性が示された。

下水道システムを有する氾濫解析においては、段落ちの式を用いて氾濫域から下水道システムへの水の流入を表すのが一般的であるが、すべての流入条件を取り扱うことが出来ない限り、落ち込み流量の総和は現実の値を示さない可能性がある。本研究の取り扱い、落ち込み流量の上限値に下水道システムの能力の目標値を用い、パラメータ的な取り扱いとしており、水理学的な表現としてはあいまいさが残る。しかし、解析では取り扱うことのできない枝線の下水管網を表現するという点から、一つの実用的なモデル化であると考えている。

2) マンホール内に存在する余水吐室のモデル化を考慮したマンホールモデルの高度化を行い、その解析結果に与える影響を考察した。その結果、対象領域の北側において、浸水深が大きく現れており、さらに、大幸幹線では、浸水域が下流側へ推移している。これは、マンホールモデルの高度化によって、幹線下水道へ流下しにくくなり、地面近くにある下水道管が満管になることによって浸水状況に影響を与えたものと考えられる。さらに、河川水位およびポンプ排出流量の結果から、マンホールモデルの高度化に伴って、解析結果が実績値と近くなっ

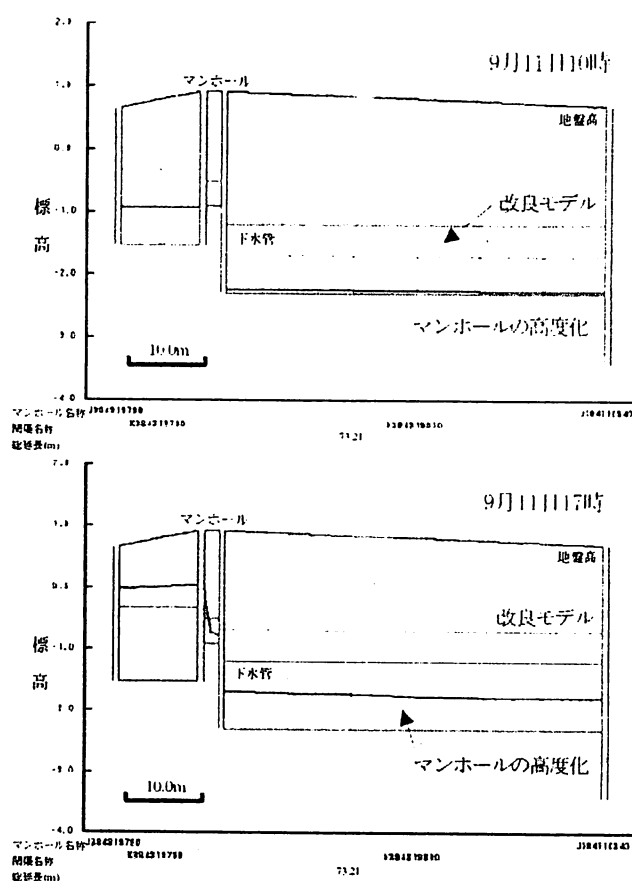


図-8 下水道内の水位

ており、マンホールモデルの高度化の妥当性が示された。これらは、下水道システムを有する氾濫解析におけるマンホールの余水吐室のモデル化の重要性を示している。

参考文献

- 1) 平成20年8月28日～31日における愛知県の出水状況 概要：愛知県建設部河川課、平成20年9月。
- 2) M. Takeda, N. Matsuo, S. Hrasima, Y. Hirayama, M. Tanaka and T. Takahashi: The inundation analysis system on urban area and its application, XXXI IAHR Conference, pp. 4956-4964, 2005.
- 3) 相良亮輔, 錦織俊之, 井上和也, 戸田圭一: 枝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, pp589-594, 2004.
- 4) 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, pp889-894, 2003.
- 5) 川池健司, 中川一, 今井洋兵: 都市域の雨水排水過程に着目した内水氾濫解析モデル, 水工学論文集, 第53巻, pp817-822, 2009.
- 6) 松尾直規, 武田誠: 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, 河川技術論文集第12巻, pp. 97-102, 2006.

(2009. 4 9受付)