

都市下水道管渠システムの浸水はんらん解析における マンホールの水理学的役割とそのランピング手法

Hydraulic Function of Manholes for Surcharged Flows and Lumping-Method of Manholes
in Urban Drainage Sewer Pipe Systems

渡辺政広*・栗原 崇**・右近雄大***・恩地研輔****

By Masahiro WATANABE, Takashi KURIHARA, Takehiro UKON and Kensuke ONJI

It has been pointed out that, for surcharged flow simulations in urban drainage sewer pipe systems, manholes are very important runoff elements that govern the pressure-wave celerity of the surcharged flow.

In the first half of this paper, a lumping-method of manhole cross-sectional areas is presented. In this method, areas of some manholes are concentrated at the area of an adjacent manhole: manhole areas are never ignored but lumped.

In the later half, the usefulness of the method is demonstrated through numerical simulations with a prismatic sewer pipe system and SWMM-EXTRAN.

Keywords: SWMM-EXTRAN, manholes, lumping-method, surcharged flow, urban drainage sewer pipe system

1. はじめに

都市域の下水道管渠網では、強雨時、圧力流れ（満管流れ、パイプ流れ、サーチャージ流れ）がしばしば発生する。こうした圧力流れ時の流出解析において、特に理論的な裏付けがあるわけではなく、単に計算（方式）を簡単化できるという理由から、マンホールでの貯留作用を無視した解析、あるいはマンホール水面積は存在しないものとする解析がしばしば採用されてきている。なぜこのような解析がこれといった裏付けのないまま採用されてきているかについては、これまで、都市域での浸水はんらんデータがほとんど実測されてきていないため、そうした簡易化した（あるいは無視した）取扱いが解析結果にどのような影響を及ぼすかをチェックしようとしても、その手立てがなかったことによるものと考えられる。

著者らは、既に^{1)~4)}、これまで指摘されることのなかったマンホールの一つの重要な水理学的役割、すなわち、マンホールでの貯留作用が圧力流れの流出特性（圧力波の伝播速度）を規定する最も重要な流出要

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科

(〒790 松山市文京町3番)

** 正会員 工修 復建調査設計(株) 水工技術部河川技術課

(〒732 広島市東区光町 2-10-11)

*** 学生会員 愛媛大学大学院 工学研究科博士前期課程土木海洋工学専攻

**** 学生会員 愛媛大学工学部 土木海洋工学科4年次生

素であることを理論的に明らかにすると共に、これに基づき、マンホール貯留を無視した流出解析結果、特に水位ハイドログラフには、致命的な誤差が含まれる可能性の高いことを指摘した。

本論文では、圧力流れの流出解析精度を低下させることなく、かつマンホール水面積をランプして取り扱う、下水道管渠システムのランピング手法を提案すると共に、本手法の有用性について、各国で広く用いられている都市域の流出シミュレーション・モデルである S W M M モデル⁵⁾を用いた数値シミュレーションを行って検討した結果を示す。

2. 下水道管渠網における圧力流れの基礎式とマンホールの水理学的役割

2.1 圧力流れの基礎式（無次元式）^{1) - 4)}

はじめに、次の基本的な仮定をおく。すなわち、① マンホールは数100本の仮想の取付管からなる集合体である。ここに、仮想の取付管の断面積の合計は、マンホールの断面積に等しい。② 図-1に示すように、これら仮想の取付管の全てを直下流の下水管渠に付け替えたとしても、圧力流れの流出特性には何らの変化も生じない。

この仮定が成立するとき、下水道管渠網における圧力流れの基礎式は、ラテラル・モデル⁶⁾を用いると、以下のように無次元表示される。

管渠における運動方程式および連続の式；

$$\frac{\partial V_*}{\partial t_*} + V_* \frac{\partial V_*}{\partial x_*} + \frac{\partial H_*}{\partial x_*} + \frac{\alpha_1}{\alpha_2^2} \cdot \frac{|V_*| V_*}{R_*^{4/3}} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H_*}{\partial t_*} + c''_*^2 \cdot \frac{\partial V_*}{\partial x_*} = 0 \quad (2)$$

マンホール地点における連続の式；

$$0 = \Sigma(Q_{in})_* - \Sigma(Q_{out})_* \quad (3)$$

ここに、

$$\alpha_1 / \alpha_2^2 = 0.014 \cdot (L/D^{4/3}), \quad \alpha_1 = (LS_0)/D, \quad \alpha_2 = V_{full} / \sqrt{gD} \quad (4)$$

$$c''_* = c'' / \sqrt{gD} = (c'_* \cdot c'_M) / \sqrt{c'^2_* + c'^2_{M*}} \quad (5)$$

$$c'_M = c'_M / \sqrt{gD} = \sqrt{g(L \cdot A_p) / F_M} / \sqrt{gD} = \sqrt{(\pi/4) / F_{M*}} \quad (6)$$

$$c'_* = c' / \sqrt{gD} = \sqrt{g(L/N)(\sin \theta)(A_p/A_L)} / \sqrt{gD} \quad (7)$$

$$\begin{cases} V_* = V / \sqrt{gD}, & H_* = H/D, & R_* = R/(D/4), & F_{M*} = F_M/(DL) \\ Q_* = Q/(\sqrt{g} \cdot D^{5/2}), & x_* = x/L, & t_* = t/(L/\sqrt{gD}) \end{cases} \quad (8)$$

また、V：断面平均流速、H：圧力水頭（水位）、R：径深、Q：流量、L、D、So、Ap：下水管渠の長さ（マンホール間の距離）、直径、こう配、断面積、N、Al、θ：取付管の接続本数（L 当り）、断面積、接続角度（水平面となす角）、FM：マンホールの水面積、Σ(Qin)：マンホールへの流入流量の合計、Σ(Qout)：マンホールからの流出流量の合計、Vfull：Manning 型の満管等流流速、g：重力加速度、t：時間、x：距離。

なお、c'：実在する取付管のみによって規定される圧力波の伝播速度、c'M：マンホールから付け替えられた仮想の取付管のみによって規定される圧力波伝播速度、c''：実在する取付管と仮想の取付管の両者によって規定される圧力波伝播速度。

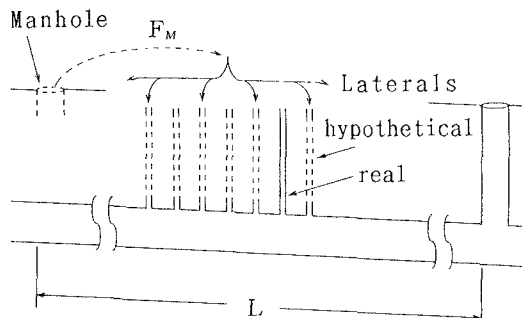


図-1 取付管（仮想）の付替え

2.2 マンホールの水理学的役割

上式および松山市公共下水道流域での調査結果^{11)・2)}より、都市下水道管渠網における圧力流れおよびマンホールの水理学的役割について、次の諸特性（特徴）が指摘される。

- ① c''_* は、流れを規定する重要な（無次元）パラメータである。
- ② 一般に、 $c'_* \gg c'_M$ であり、したがって、次式 (9) が成立するとしてよい。

$$c''_* = c'_M \quad (9)$$

③ 式 (6) および上記 ①、② より、マンホールあるいはマンホール水面積は、圧力流れの伝播特性（流出特性）を決定づける重要な流出要素である。

④ したがって、マンホールの水面積を無視する取扱い、条件にもよるものと考えられるが、流出解析結果に致命的な誤差を生じさせる、すなわち、流出解析精度を著しく低下させる可能性が十分にある。

2.3 基本仮定の妥当性に関する検討

上述した基本仮定の妥当性について、図-2 および表-1 に示すような、直径 D が 0.25 m の下水管渠からなるプリズマチックな下水管渠システムを対象に流出シミュレーションを行なって検討した。具体的には、既に提案しているラテラル・モデルを用い、マンホールを仮想的取付管に置き換え、かつそれら仮想取付管の全てを下流の下水管渠に付け替えた下水管渠システム (Pipe System with Hypothetical Laterals and Real Laterals) における流出シミュレーション結果とそれらの流出特性を、通常の下水管渠システム (Pipe System with Manholes and Real Laterals) におけるそれらと対比し、どのような変化・相違が生ずるかを調べた。

ここに、上流端境界条件として、sine 型の流入流量ハイドログラフ（周期 $T=300$ sec, ベース流量 Q_b =マニング型の満管等流流量 $=0.04695 \text{ m}^3/\text{s}$, ピーク流量 $Q_p=1.5 \times Q_b$ ）を、下流端境界条件として、水位一定 (=管頂高 + 0.05 m) を与えた。また、初期条件は、流量 Q_b のもとでの定常圧力流れとした。

流出シミュレーション結果の例として、下水管渠システムの中流部における流量ハイドログラフを比較して図-3 に、上流端における水深ハイドログラフを比較して図-4 に示す。これらより、上述した基本仮定の妥当性について、以下の諸点が指摘できる。

- ① ピーク水深の相対誤差の最大は 5% 程度、また、ピーク流量のそれは 2% 程度以内で、水深および流量のピーク値には、実用上からは、違いはほとんど現われていないと言える。
- ② 水深および流量ハイドログラフの流出波形をみると、流出がやや遅れ、やや扁平化する傾向が現われ

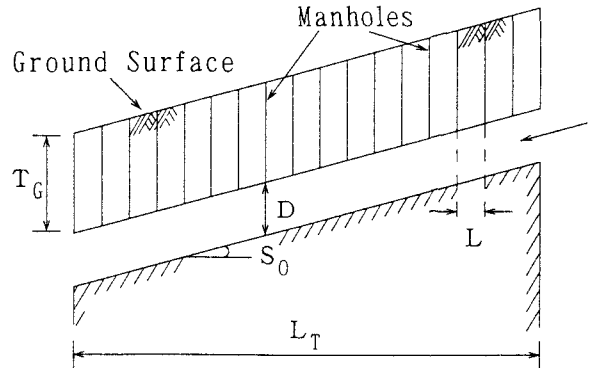


図-2 検討に用いた下水管渠システム

表-1 下水管渠システムの諸元

Sewer Pipe Length (L) Diameter (D) Slope (S ₀) Roughness (n)	30 m 0.25 m 0.0083 m/m 0.015 m ^{-1/3} ・s
Number of Pipes	17
Length of Pipe System (L _G)	510 m
Manhole Depth (D + T _G) Cross-sectional Area (F _M)	2.2 m ² 0.6 m ²

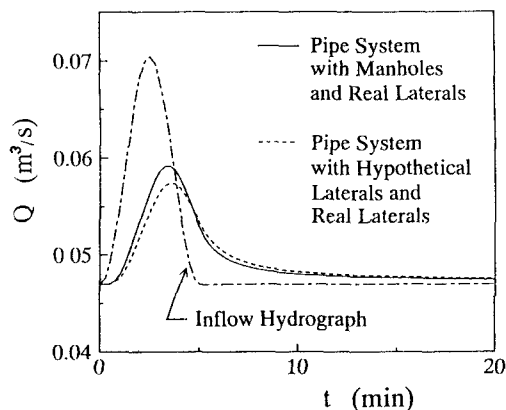


図-3 流量ハイドログラフの比較（中流部）

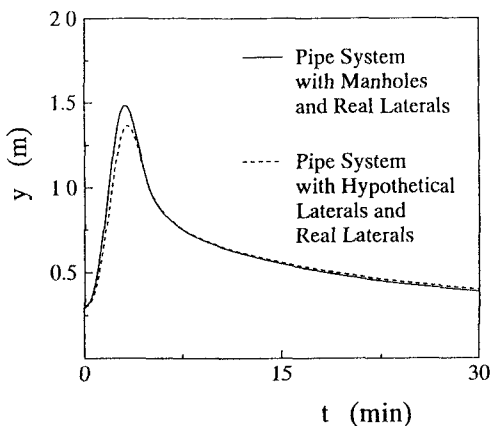


図-4 水深ハイドログラフの比較（上流端）

ているが、流出ピークの発生時間のずれも1分以内であり、実用上からは、流出性状にも違いはほとんど現われてきていないと言える。

③ すなわち、先の基本仮定は、実際にも成立する極めて妥当な仮定であると言える。

3. 下水道管渠網の簡易化に関する考察と数値シミュレーション

はじめにも述べたように、圧力流れの流出計算を簡単化・単純化するため、マンホールの水面積を無視した解析が、しばしば、採用されてきている。しかし、既に述べてきているように、こうしたマンホールの貯留作用を無視することは、圧力流れの流出特性を規定する重要な流出要素を無視することであり、条件によっては、当然、流出解析結果に致命的な誤差が生ずる可能性が高い。

ここでは、下水管渠システム内に分布している各マンホールの水面積をランピングして取り扱い、流出解析精度を低下させることなく管渠システムを単純化・簡単化しえるランピング手法を提案すると共に、本手法の有用性について、数値シミュレーションを行なって検討した。

3.1 マンホール水面積のランピング手法に関する考察

先述の基本仮定が実際にも成立する仮定であることより、流出解析精度を低下させることなく、以下の考え方・手順で、マンホール水面積のランピングを遂行しえんと考えられる。

① マンホールを取付管の集合体と考え、これら取付管の全てを下流の下水管渠に付け替えても、圧力流れの流出特性には何の変化も生じないことより、こうした付け替えを行なって得られる下水管渠システムを、逆に、実際の下水管渠システムであるとみなすことができる。

② こうした考えのもとでは、マンホールを有する実際の下水管渠システムの各マンホールは、「1本の下水管渠内に分布している多数の（仮想）取付管をランピングし、下水管渠上流端に集合させたもの」とみなすことができる。

すなわち、上記 ①、② は、「ある1本の下水管渠に分布している（仮想）取付管を下水管渠上流端の1ヶ所に集中させても、圧力流れの流出特性には何らの変化も生じない」ことを意味している。

③ この事実と考え方を拡張すると、「連続するある M ($=2, 3, \dots$) 本の下水管渠にわたって分布している（仮想）取付管をそれら下水管渠の上流端の1ヶ所に集中させても、圧力流れの流出特性には、実用上、問題となるような変化は生じないであろう」ことが予測される。

別の言い方をすると、「連続する幾つかのマンホール水面積を束ね、それらを上流端の1つのマンホールとして1ヶ所に集中させるとしても、そのランピングの程度（束ねる水面積の個数）が適切であれば、実用

上、問題となるような流出解析精度の低下は生じないであろう」ことが予測される。

3.2 検討に用いた下水管渠システムと流出シミュレーションの境界・初期条件

前述した直径 D が 0.25 m の 17 本 (区間) の下水管渠と水面積 F_M が 0.6 m^2 の 17 個のマンホールからなるブリズマチックな下水管渠システム (図-2、表-1 および図-5) を、検討対象の下水管渠システムとして採用した。

上流端境界条件として、sine 型の流入流量ハイドログラフ ($T=900\text{ sec}$, $Q_b=\text{満管等流量}=0.04695\text{ m}^3/\text{s}$, $Q_p=1.5\times Q_b$) を、下流端境界条件として、水位一定 (=管頂高+ 0.05 m) をそれぞれ設定した。また、初期条件は、流量 Q_b のもとでの定常圧力流れであるとした。

なお、流出シミュレーションを遂行するに際し、ここでは、現在、各国で広く用いられている **SWMM-EXTRAN⁵⁾** を採用することとした。

3.3 検討の方法

上述した実在する下水管渠システム (STRG) をもとに、幾つかのマンホール (水面積) を単に無視して単純化を図っている下水管渠システム (SA) および提案しているランピング手法に基づいて幾つかのマンホール (水面積) の集中化を図っている下水管渠システム (SB) を作成し、これら 3 種の下水管渠システムを対象に雨水流出シミュレーションを行い、これらシミュレーション結果を対比して、マンホール水面積を単に無視する場合にどの程度の解析誤差が現われるか、また、これに対して、提案しているランピング手法に基づいてマンホール水面積の集中化を図る場合にそうした解析誤差がどの程度まで改善されてくるかを調べ、提案している手法の有用性を検討した。

なお、SA タイプの下水管渠システムとして、3, 5, 7, 9, 11, 13, 14, 15 個のマンホール水面積を単に無視している、それぞれ、SA-3, SA-5, SA-7, SA-9, SA-11, SA-13, SA-14, SA-15 の合計 8 タイプを作成し、SB タ

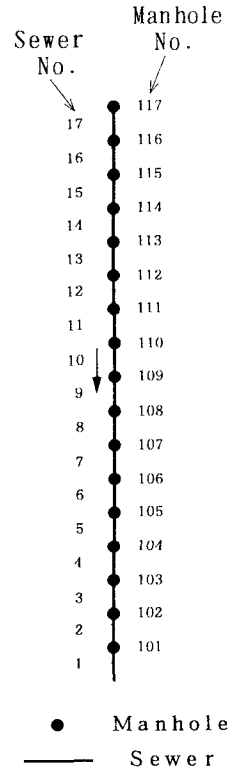
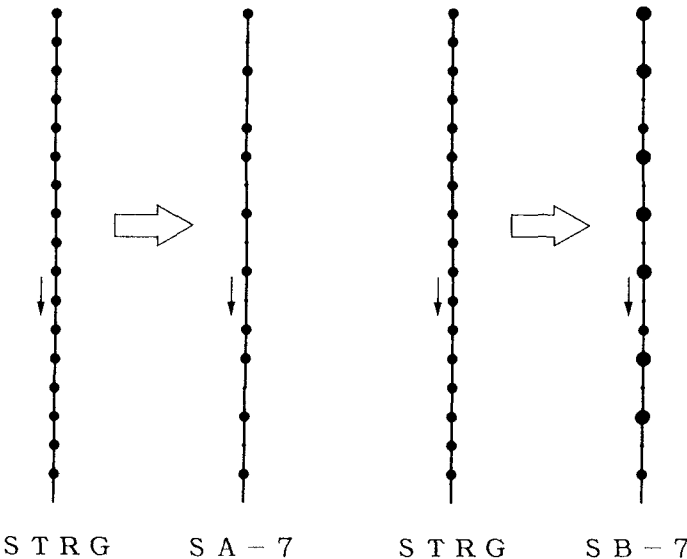


図-5 下水管渠システムのマンホール番号と下水管渠番号



(a) 無視する場合 (b) ランピングする場合
図-6 下水管渠システムとマンホール水面積 (7 個) の取扱い

イプの下水管渠システムとして、3, 5, 7, 9, 11, 13, 14, 15 個のマンホール水面積をランピングして取り扱っている、それぞれ、SB-3, SB-5, SB-7, SB-9, SB-11, SB-13, SB-14, SB-15 の合計 8 タイプを作成している (図-6 および 7)。

また、表-2 には、各下水管渠システムにおける各マンホールの水面積の値を示している。ここに、表中の (一) 印は、水面積 F_M が $F_M=0$ であることを示す。

3.4 流出シミュレーション結果と考察

流出シミュレーション結果の例として、2 種の下水管渠システムの上流端における水深（ y ）ハイドログラフを、図-8 および 9 に示す。また、上流端水深ハイドログラフのピーク水深および下流端流量ハイドログラフのピーク流量について、SA および SB タイプの下水管渠システムにおけるシミュレーション結果の STRG タイプの下水管渠システムにおけるそれに対する相対誤差（ E_y および E_Q ）を調べ、それぞれ、図-10 および 11 に示す。

これらより、マンホール水面積の取扱いと流出解析精度との関係について、以下の諸点が指摘される。

① SA および SB いずれのタイプの下水管渠システムについても、流出シミュレーション結果の解析精度の低下は、図-10 および 11 か

らも明らかなように、水深（水位）ハイドログラフにおいて顕著に現われる。

② これは、浸水はんらん解析を遂行する場合、マンホール（水面積）の取扱いが非常に重要となってくることを明示している。

③ SA タイプの下水管渠システムの流出シミュレーション結果、特に、水位（水深）ハイドログラフをみると、無視するマンホール水面積の個数が 10 個程度を上回るようになると、図-9～11 から明らかなように、それらハイドログラフの解析精度は、致命的とも言える程度にまで低下してくる。

④ 一方、SB タイプの下水管渠システムにおけるシミュレーション結果をみると、14 個程度ものマンホール水面積がランピングして取り扱われている場合でも、解析精度の低下はほとんどみられない。

⑤ 以上より、ここに提案したマンホール水面積のランピング手法の有用性は、かなり高いものになると

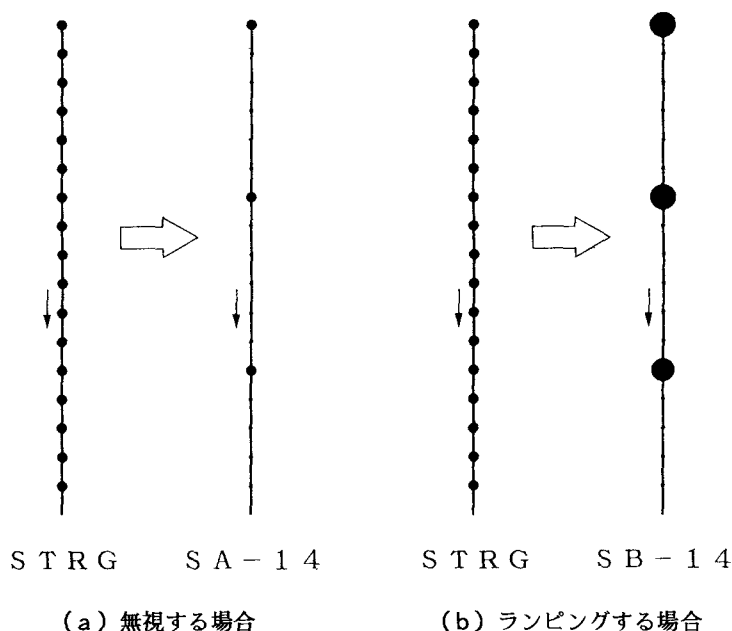


図-7 下水管渠システムとマンホール水面積（14 個）の取扱い

表-2 下水管渠システムとマンホールの水面積

PIPE	Manhole Number																
	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117
SYSTEM	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
STRG	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
SA-3	0.6	0.6	0.6	-	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-	0.6
SB-3	0.6	0.6	0.6	-	1.2	0.6	0.6	0.6	0.6	-	1.2	0.6	0.6	0.6	0.6	-	1.2
SA-5	0.6	-	0.6	0.6	0.6	-	0.6	0.6	-	0.6	0.6	0.6	-	0.6	0.6	-	0.6
SB-5	0.6	-	1.2	0.6	0.6	-	1.2	0.6	-	1.2	0.6	0.6	-	1.2	0.6	-	1.2
SA-7	0.6	-	0.6	-	0.6	0.6	-	0.6	-	0.6	-	0.6	0.6	-	0.6	-	0.6
SB-7	0.6	-	1.2	-	1.2	0.6	-	1.2	-	1.2	-	1.2	0.6	-	1.2	-	1.2
SA-9	-	-	0.6	-	0.6	-	0.6	-	0.6	-	0.6	-	0.6	-	0.6	-	0.6
SB-9	-	-	1.8	-	1.2	-	1.2	-	1.2	-	1.2	-	1.2	-	1.2	-	1.2
SA-11	-	0.6	-	-	0.6	-	-	0.6	-	-	0.6	-	-	0.6	-	-	0.6
SB-11	-	1.2	-	-	1.8	-	-	1.8	-	-	1.8	-	-	1.8	-	-	1.8
SA-13	-	-	-	-	0.6	-	-	-	0.6	-	-	-	0.6	-	-	-	0.6
SB-13	-	-	-	-	3.0	-	-	-	2.4	-	-	-	2.4	-	-	-	2.4
SA-14	-	-	-	-	0.6	-	-	-	-	-	0.6	-	-	-	-	-	0.6
SB-14	-	-	-	-	3.0	-	-	-	-	-	3.6	-	-	-	-	-	3.6
SA-15	-	-	-	-	-	-	-	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	0.6
SB-15	-	-	-	-	-	-	-	4.8	-	-	-	-	-	-	-	-	5.4

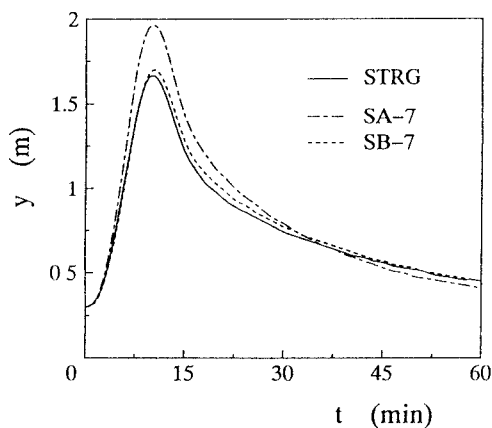


図-8 水深ハイドログラフの比較

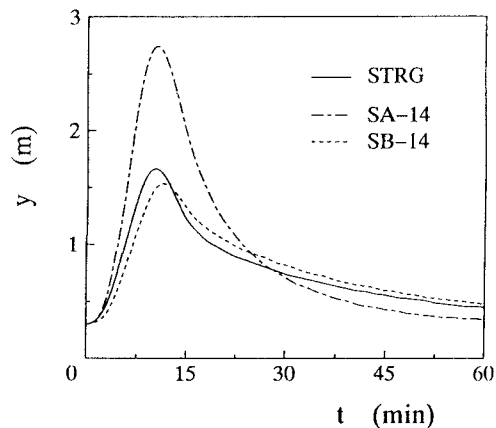


図-9 水深ハイドログラフの比較

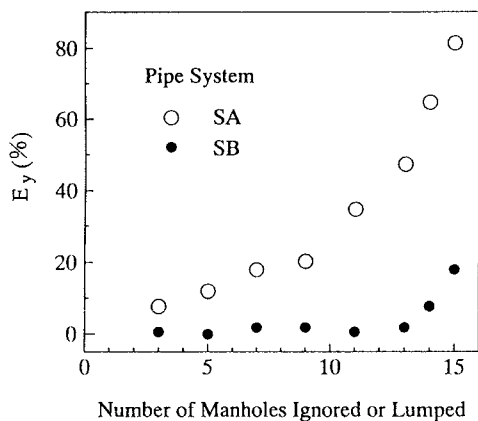


図-10 ピーク水深の相対誤差

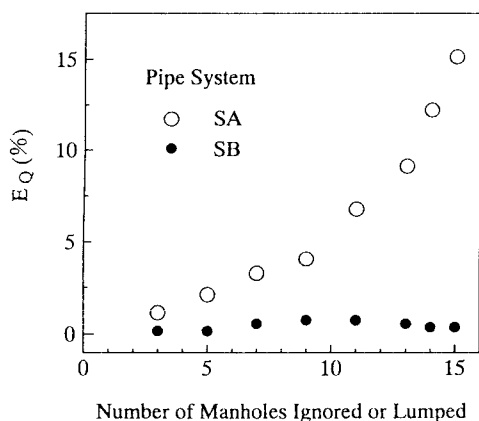


図-11 ピーク流量の相対誤差

期待される。

4. 結 論

本論文では、圧力流れの流出解析精度を低下させることなく、かつマンホール水面積をランプして取り扱う、下水管渠システムのランピング手法を提案すると共に、本手法の有用性について、各国で広く用いられている都市域の流出シミュレーション・モデルである SWMM-EXTRAN モデルを用いた数値シミュレーションを行って検討した。

得られた結果を要約すると、以下のようである。

1) マンホール水面積を単純に無視して取り扱った下水管渠システムにおける流出シミュレーション結果の解析精度には、ここで検討した下水管渠システム ($D=0.25$ m) に関する限り、無視するマンホール水面積の割合がわずかに増加すると、致命的とも言える程度まで低下してくる傾向がみられた。

2) 一方、マンホール水面積をランプして取り扱う手法を適用した下水管渠システムの場合には、そうした解析精度の低下は、ここで検討した下水管渠システム ($D=0.25$ m) に関する限り、ほとんど現われてこない。

3) これらより、ここに提案したマンホール水面積のランピング手法が、圧力流れを実用的に解析する際

に利用できる有力な手法であることが明らかとなった。

以上，ここでは，特定の規模の下水管渠システムを対象に議論を進めてきたが，今後は，こうした議論をより普遍的なものへと発展させる必要がある。

参 考 文 献

- 1) 渡辺政広，石丸久人：マンホールの圧力解放効果を利用したサーチャージ流出の実用的な解析手法，水工学論文集，第36巻，pp. 653～658，1992.
- 2) Watanabe, M. and T. Kurihara: Practical simulation method of surcharged flow using pressure-relaxation effect in manhole, Proc. 6th Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Vol. 1, pp. 128～133, 1993.
- 3) 渡辺政広，栗原 崇，時尾嘉弘，藤田和博：下水道管渠網・地下河川網におけるマンホール・立坑の水理学的役割，水工学論文集，第38巻，pp. 525～530，1994.
- 4) Watanabe, M. and T. Kanda: Surcharged flow parameters and SWMM simulations, Proc. 2nd Int. Conf. on Innovative Technologies in Urban Storm Drainage, pp. 631～634, 1995.
- 5) Roesner, L. A. et al.: Storm Water Management Model, Ver. 4, Part B ; EXTRAN Addendum, USEPA /600/3-88/001b, 1988.
- 6) Watanabe, M., T. Etoh and A. Murota : Runoff simulation of sewer pipe systems with lateral pipes, J. Natural Disaster Science, Vol. 13, No. 1, pp. 19～28, 1991.