

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

Hydraulic Function of Manholes for Surcharged Flow in
Urban Drainage Sewer Systems

渡辺政広*・栗原 崇**・時尾嘉弘***・藤田和博***

By Masahiro WATANABE, Takashi KURIHARA, Yoshihiro TOKIO
and Kazuhiro FUJITA

It has been pointed out that, for surcharged flow simulations in urban drainage sewer 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 theoretical expression of the celerity, which evaluates a hydraulic function of manholes, is presented. In the later half, numerical simulations with representative urban sewer and simple underground channel systems are made using SWMM-EXTRAN, and the influence of a manhole storage on runoff characteristics of the surcharged flow are investigated.

Keywords: pressure-relaxation, manhole, surcharged flow, SWMM-EXTRAN, urban drainage sewer system

1. 序 論

都市域の下水道管渠網では、降雨時、圧力流れ（サーチャージ流れ、満管流れ、パイプ流れ）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、マンホールでの貯留作用を無視した解析がしばしば行われてきている。これは、マンホールでの貯留作用が圧力流れの流出特性にどのような影響を及ぼすか理論的に明らかにされていなかったこと、またそうした貯留作用を無視した取扱いにより流出解析をかなり簡単化できること、などによるためと考えられる。

著者らは、既に^{1)・2)}、これまで指摘されることのなかったマンホールのもう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。本論文は、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 モデル³⁾を用いて数値シミュレーションを行い、これまでに示してきた理論および指摘の妥当性を実証的に明らかにしようとするものである。

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科

** 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部土木海洋工学科

*** 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

(〒790 松山市文京町3番)

2. マンホールおよび取付管の圧力解放効果を考慮した圧力流れの基礎式

2.1 取付管の圧力解放効果を考慮した圧力流れの基礎式^{4), 5)}

(a) 圧力流れの基礎式 (ラテラル・モデル, 図-1)

都市域の下水道管渠網における下水管渠 (L 区間) には, 雨水や汚水を下水管渠に排除するための取付管 (laterals, 直径 15~20 cm) が数多く接続されている。これら取付管における流出雨水の貯留作用を考慮すると, 下水管渠における圧力流れの運動方程式および連続の式はそれぞれ次式のように表される。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{n^2 |V| V}{R^{4/3}} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c'^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (2) \quad ; \quad c' = \sqrt{g \frac{L}{N} (\sin \theta) \frac{A_p}{A_l}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに, V : 断面平均流速, H : 圧力水頭 (水位), R : 径深, L, n, A_p : 下水管渠の長さ (マンホール間の距離), Manning の粗度係数, 断面積, N, A_l, 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), c' : 取付管により規定される圧力波の伝播速度, g : 重力加速度, t : 時間, x : 距離。

また, マンホールにおける流れの基礎式は, マンホール地点での入口・出口損失が下水管渠における摩擦損失の中に含めて取り扱えるものとする, 次式のように表される。

$$F_M (dH_M/dt) = \Sigma(Q_{in}) - \Sigma(Q_{out}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに, H_M : マンホール地点での水位, F_M : マンホールの水面積, $\Sigma(Q_{in})$: マンホールへの流入流量の合計, $\Sigma(Q_{out})$: マンホールからの流出流量の合計。

式 (3) から明らかなように, 圧力波伝播速度 c' は下水管渠および取付管の諸量により規定され, 松山市公共下水道流域における既往の調査結果^{1), 2), 6)} によれば 10~100 m/sec 程度の値をとる。すなわち, 圧力波伝播速度はこれまで弾性波としての値 1,000~1,400 m/sec をとるとされてきたが, 実際には, 取付管による圧力解放効果によって大きく抑制され, 弾性波の場合に比べて 1~2 オーダも小さい値をとる。

(b) 基礎式の無次元化

流れ方向の長さの代表値に下水管渠長 L , 鉛直方向のそれに管渠径 D , 流速の代表値に $\sqrt{gD}$ を採用すると, 上記の基礎式は以下のように無次元表示される。

$$\frac{\partial V_*}{\partial t_*} + V_* \frac{\partial V_*}{\partial x_*} + \frac{\partial H_*}{\partial x_*} + \frac{\alpha_1}{\alpha_2^2} \frac{|V_*| V_*}{R_*^{4/3}} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial H_*}{\partial t_*} + c_*'^2 \frac{\partial V_*}{\partial x_*} = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$F_{M*} (dH_{M*}/dt_*) = \Sigma(Q_{in})_* - \Sigma(Q_{out})_* \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$; \quad \alpha_1/\alpha_2^2 = 0.014 \cdot (L/D^{4/3}), \quad \alpha_1 = (LS_0)/D, \quad \alpha_2 = V_{full}/\sqrt{gD} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$; \quad c_*' = c'/\sqrt{gD} \quad \dots\dots\dots (9)$$

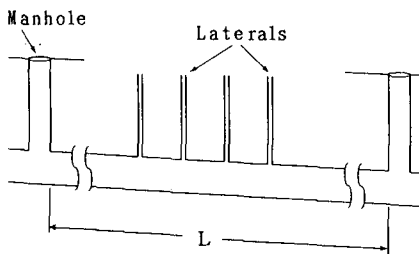


図-1 下水管渠と取付管

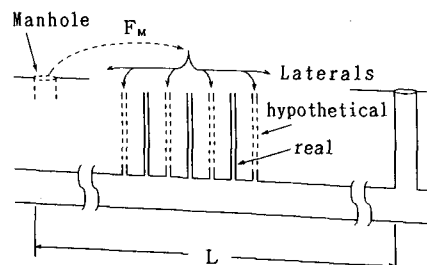


図-2 取付管 (仮想) の付替え

$$; F_{M*} = F_M / (DL) \dots\dots\dots (10)$$

$$; \begin{cases} V_* = V / \sqrt{gD}, & H_* = H/D, & R_* = R/(D/4), \\ Q_* = Q / (\sqrt{g} \cdot D^{5/2}), & x_* = x/L, & t_* = t/(L/\sqrt{gD}) \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 S_0 : 管渠勾配、 V_{full} : Manning 型の満管等流速、 Q : 流量。

上式 (5)~(7) より、下水道管渠網の圧力流れは α_1/α_2^2 、 c'_* および F_{M*} の3つの無次元パラメータにより支配されていることが分かる。これらは、それぞれ管渠勾配の緩急、開水路流れの伝播速度に対する圧力流れのその比、および管渠縦断面積に対するマンホール水面積の比を表している。

2.2 取付管およびマンホールの圧力解放効果を考慮した圧力流れの基礎式^{1), 2)}

(a) 圧力流れの基礎式 (無次元式、図-2)

マンホールが数100本の取付管 (hypothetical laterals) からなる集合体であり、かつ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得るとする^{1), 2)}。このとき、下水道管渠網における圧力流れの基礎式は以下のように無次元表示される (ここに、下水管渠における運動方程式は式 (5) と同一である)。

$$\frac{\partial H_*}{\partial t_*} + c''_* \cdot \frac{\partial V_*}{\partial x_*} = 0 \dots\dots\dots (12)$$

$$0 = \Sigma(Q_{in})_* - \Sigma(Q_{out})_* \dots\dots\dots (13)$$

$$; c''_* = c'' / \sqrt{gD} = (c'_* \cdot c'_{M*}) / \sqrt{c'^*_*{}^2 + c'_{M*}{}^2} \dots\dots\dots (14)$$

$$; c'_{M*} = c'_M / \sqrt{gD} = \sqrt{g(L \cdot Ap) / F_M} / \sqrt{gD} = \sqrt{(\pi/4) / F_{M*}} \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 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。

(b) 流れを規定する無次元パラメータ

上式 (5), (12), (13) および松山市公共下水道流域での既往の調査結果 (文献 6), 図-3, 4) より、流れを規定する無次元パラメータおよび都市下水道管渠網の圧力流れについて次の諸特性が指摘される。

- ① 上述した付替えにより、マンホールの圧力解放効果を理論的に取り扱うことが可能となる。
- ② 流れを規定する無次元パラメータは、 c''_* および α_1/α_2^2 の2つである。
- ③ 図-4 から明らかなように、次式 (16) が成立するとしてよい。

$$c''_* = c'_{M*} \dots\dots\dots (16)$$

- ④ 下水道管渠網の圧力波伝播速度 c'_{M*} (あるいは c'_M) は、下水管渠における圧力波伝播速度 c'_* (あるいは c') の $1/3 \sim 1/5$ 程度の小さい値をとる。
- ⑤ c'_{M*} ($= c''_*$) および α_1/α_2^2 は、いずれも管渠径 D のべき関数として表される。
- ⑥ 上記 ⑤ より、流れを規定する無次元パラメータは、実際上は、 c'_{M*} の1つであると言える。
- ⑦ 式 (15) および上記 ⑥ より、マンホールあるいはマンホール水面積は流れの伝播特性 (流出特性) を決定づける重要な流出要素である。

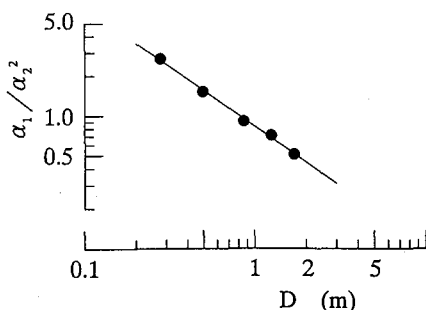


図-3 $\alpha_1/\alpha_2^2 \sim D$ 関係 (松山市)

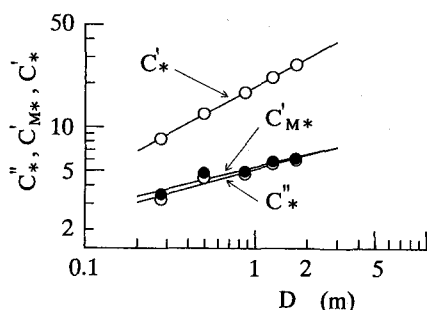


図-4 $c'_*, c'_{M*}, c''_* \sim D$ 関係 (松山市)

3. 数値実験による検討

下水道管渠網および地下河川網を対象として、マンホール（あるいは立坑）での貯留作用を考慮する本来の流出シミュレーション（Storage タイプ）結果をそれを無視したシミュレーション（Regular タイプ）結果と対比し、マンホール（立坑）貯留作用（圧力解放効果）と下水道管渠網（あるいは地下河川網）における圧力流れの流出特性との関係を数値実験的に検討した。なお、流出シミュレーションには、各国で広く用いられている SWMM のサブ・モデルで下水道管渠網における流出を解析する EXTRAN モデル³⁾を用いた。

3.1 下水道管渠網における検討⁷⁾

(a) 下水道管渠システムと上下流端境界条件

はじめに、検討に用いた管渠システムは、実流域の下水道管渠網で見られる標準的（代表的）な諸元をもつ7種のプリズマチックな下水道管渠システム（表-1、図-5）である。次に、これらの管渠システムと EXTRAN モデルを用い、上流端での流量ハイドロおよび下流端での水位ハイドロを種々に想定して、Storage および Regular の両タイプの流出シミュレーションを行った。さらに、これらシミュレーション結果を対比して、Regular タイプの流出シミュレーション結果の Storage タイプに対する誤差を調べた。

(b) 流出シミュレーション結果と考察

初期条件として定常圧力流れ（水深 $\approx 1.3 \times$ 管渠径，満管等流量），上流端境界条件として sine 型洪水（周期 $T=5\sim 60$ 分，ピーク流量 $\approx 1.4 \times$ 満管等流量），下流端境界条件として一定水位を与えたときの流出シミュレーション結果および誤差の検討結果の例を図-6～9に示す（図中、 y は水深、 T_* は式（11）より算定される周期 T の無次元量，添字 R, S は Regular, Storage のタイプを表す）。

これらの流出シミュレーションを通じて得られた興味ある知見の幾つかを以下に述べる。

- ① マンホール貯留を無視した取扱いによる誤差は、水位（水深）ハイドログラフにおいて顕著に表れる。
- ② 管渠システムの規模が小さく（ c'_{M*} が小さく）、また洪水周期 T が短くなるにつれ、マンホールの圧力解放効果が増大して誤差は次第に顕著となる。
- ③ c'_{M*} が 5 程度（ $D=0.7\sim 1.0$ m）を上回る規模の管渠システムでは、一般に、マンホール貯留効果（圧力解放効果）が流れに及ぼす影響は小さく、誤差は 10 %程度以内に納まる。
- ④ 一方、 c'_{M*} が 5 程度を下回る管渠システムでは、マンホール貯留を考慮した取扱いが必要であり、これを無視したシミュレーション結果の誤差は 数10～100 %程度にまで上る可能性が高い。

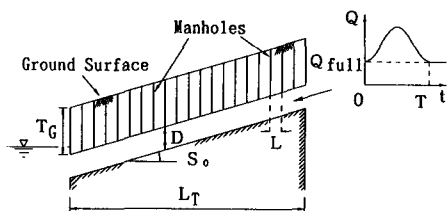
3.2 地下河川網における検討

(a) 地下河川システムと上下流端境界条件

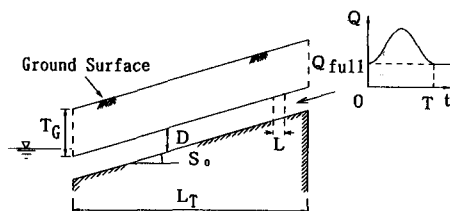
はじめに、4 区間からなるプリズマチックな地下河川システム（図-10）を検討の対象とした。各区間の河川（円形断面）の長さは 1000 m，直径は 10 m，こう配は 0.0001，立坑の直径は 15 m（ $F_M=177$ m²），また $c'_{M*}=8.2$ である。次に、立坑への洪水ハイドロ（4カ所，台形），下流端立坑での水位ハイドロを種々に想定し、Storage および Regular の両タイプの流出シミュレーションを行った。

表-1 下水管渠システムとその諸元

Type	D (m)	L (m)	S ₀ (%)	T _G (m)	F _M (m ²)	L _T (m)	α_1	α_2	α_1/α_2^2	c'_{M*}	F _{M*}
1	0.25	30	8.3	1.75	0.611	510	0.996	0.611	2.667	3.11	0.0814
2	0.5	45	5.4	2.1	0.900	765	.486	.553	1.588	4.43	.0400
3	0.7	50	4.5	2.3	1.470	800	.321	.534	1.125	4.32	.0420
4	1.0	60	3.8	2.5	2.332	1020	.228	.521	0.840	4.50	.0389
5	1.2	65	3.2	2.6	2.714	1040	.173	.493	0.712	4.75	.0348
6	1.5	75	2.8	2.8	2.813	1050	.140	.479	0.611	5.60	.0250
7	2.0	80	2.5	3.8	2.935	1040	.100	.474	0.445	6.54	.0183

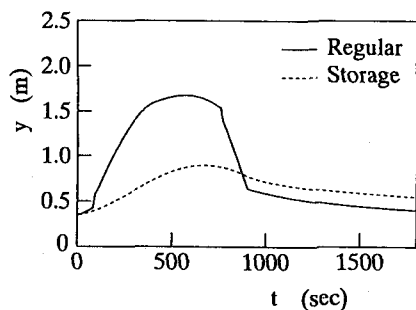


(a) Storage タイプ

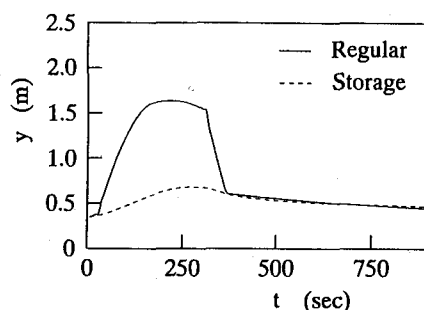


(b) Regular タイプ

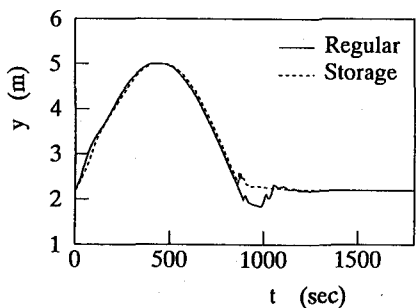
図-5 下水管渠システムの概要



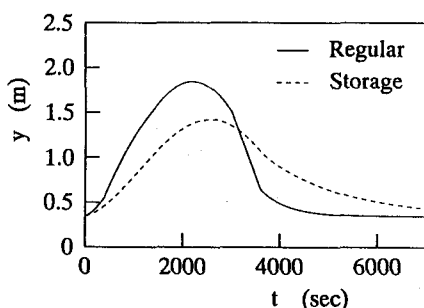
(a) Type 1



(a) T=300 秒 ($T_* = 15.7$)



(b) Type 7



(b) T=3,600 秒 ($T_* = 188$)

図-6 水深ハイドログラフ (T=900 秒, 上流端)

図-7 水深ハイドログラフ (Type 1, 上流端)

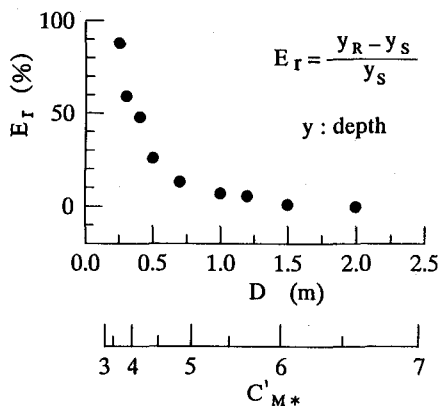


図-8 ピーク水深の相対誤差 (T=900 秒, 上流端)

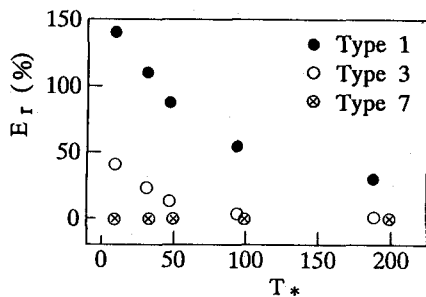


図-9 周期 T とピーク水深の相対誤差 (上流端)

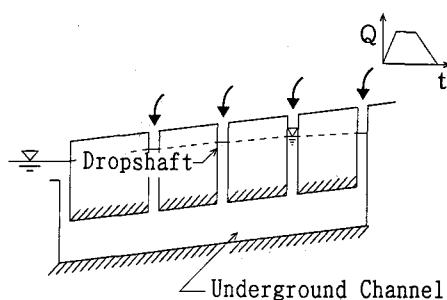


図-10 地下河川システムの概要

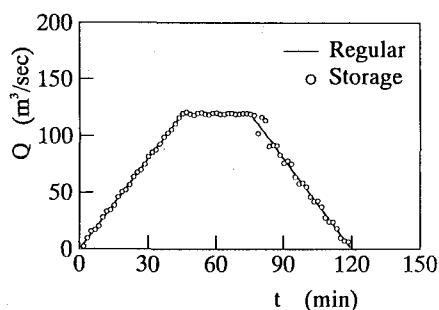


図-11 流量ハイドログラフ（下流端）

(b) 流出シミュレーション結果と考察

ピーク流入流量 $120 \text{ m}^3/\text{s}$ 、洪水継続時間 120 分、下流端水位一定の条件での流出シミュレーション結果の例を図-11 に示す。本システムの c'_M 値は上述のように 5 を大きく上回っており、下水道管渠網での検討結果から予測される通り、両シミュレーション結果はほぼ一致している。

一般に、地下河川網の各区間は、長さ 1000~2000 m、直径 5~15 m の円形断面河川と、直径 10~20 m の立坑より構成されており、これら区間の c'_M 値は、通常、5 を上回っている。すなわち、地下河川網での流出解析に際しては、エネルギー・ロスの問題を別とすれば、立坑を無視した解析を行っても、実用上からはシミュレーション結果の精度には何ら問題は生じないと言える。

4. 結 論

本論文では、下水道管渠網におけるマンホールおよび地下河川網における立坑での貯留作用が圧力流れの流出特性（圧力波伝播特性）に及ぼす影響を数値シミュレーションを行って検討した。これより、マンホール・立坑は圧力流れの流出特性を決定づける重要な流出要素であり、貯留作用に関する無次元パラメータ c'_M が 5 程度を下回る下水道管渠網・地下河川網において、マンホール・立坑を無視した場合の流出シミュレーション結果、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明らかにした。なお、本研究の一部は文部省科学研究費（一般研究(C)）による研究助成を得て行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 渡辺政広・石久久人：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) Roesner, L. A. et al. : Storm Water Management Model, Ver. 4, Part B ; EXTRAN Addendum, USEPA/600/3-88/001b, 1988。
- 4) 渡辺政広・江藤剛治・室田 明：取付管の調圧効果を考慮した下水管網内の遷移流計算法，土木学会論文集，第411号／Ⅱ-12, pp. 81~90, 1989。
- 5) 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。
- 6) 渡辺政広・室田 明：都市域の流出解析（1）一下水管渠網特性一，自然災害科学，8巻2号，pp. 9~22, 1989。
- 7) 渡辺政広・栗原 崇・時尾嘉弘：都市下水道管渠網におけるマンホールの水理学的役割について，水文・水資源学会1993年研究発表会要旨集，pp. 160~161, 1993。