

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

Practical Simulation Method of Pressurized Flow in
Drainage Sewer System

渡辺政広*・石丸久人**

By Masahiro WATANABE and Hisato ISHIMARU

A practical runoff simulation method of a surcharged flow in the sewer pipe systems is presented. First, a pressure-relaxation effect, which is caused by the storage of runoff water in both the manholes and the lateral pipes and reduces considerably the pressure wave celerity of the surcharged flow, is analyzed theoretically. Second, a practical simulation method of the flow, in which the large computational time interval can be used compared with the traditional simulation methods, is devised by making use of the relaxation effect. Finally, the validity of the method is examined by the laboratory experiment and the numerical simulation.

Keywords: urban sewer system, stormwater runoff, surcharged flow, manhole and lateral pipe, pressure-relaxation effect

1. 序 論

都市域の下水管渠網では、開水路流れとともに、圧力流れ（サーチャージ流れ、管路流れ）、開水路流れと圧力流れの間の遷移流れ、地表面はらん、などがしばしば現れる。このようなサーチャージを伴う流出の解析にあたり、下水管渠の圧力波伝播速度 c' は、解析の精度（信頼度）と費用（計算時間）を支配する重要なパラメータである。 c' は、既に^{1)・2)}明らかにしているように、概ね 10~100 m/sec 程度の値をとる。したがって、これと CFL 条件より定まるサーチャージ流れ時の計算時間間隔 Δt は、 $10^{-1} \sim 10^1$ sec のオーダーのかなり小さいものとなり、サーチャージを伴う流出の計算に要する時間と費用は、一般に、膨大なものとなる。このため、下水道流域の浸水はらん解析は、多くの場合、規模の大きい幹線管渠のみを対象としたマクロなものに限定されているのが実状である。しかし、今後益々増えることが予想されるポンプ場などでの各種流出制御の実施にあたっては、末端の枝線管渠まで組み入れたミクロな解析が不可欠であり、こうした浸水はらん解析の実用性を一層向上させ得る新しい手法の開発が必要となってくる。

本論文では、下水管渠網に多数存在しているマンホールの圧力解放効果に着目し、まず、サーチャージ流

* 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)

** 学生会員 愛媛大学大学院 工学研究科
(〒790 松山市文京町3番)

れ時の下水管渠網の圧力波伝播速度と取付管およびマンホールの圧力解放効果との関係を理論的に明らかにする。これより、下水管渠網における圧力波の伝播特性は、その大部分が、マンホールの圧力解放効果によって支配されていることが示される。次に、このマンホールの圧力解放効果を下水管渠に分散させ、見掛け上、下水管渠の圧力波伝播速度をかなり小さい値に設定して取り扱い得る手法を考案した。これを流出シミュレーションに応用すると、従来の 3～5 倍程度大きい Δt 値を採用しえることが示される。さらに、提案した手法を流出実験と数値実験に適用したところ、本手法を用いれば、解析精度を低下させることなく、サーチャージを伴う流出解析の実用性を大きく向上させ得ることが確かめられた。

2. 取付管とマンホールの圧力解放効果を考慮した流れの基礎式と圧力波の伝播特性

2.1 取付管の圧力解放効果を考慮した流れの基礎式と圧力波伝播速度^{1), 2)}

(a) 流れの基礎式 (ラテラル・モデル)

都市域の下水管渠網は、多数の取付管 (図-1) が接続する下水管渠 (上・下流マンホール間の管渠部分) とマンホールから構成されている。下水管渠網におけるサーチャージ流れの基礎式は、取付管による圧力解放効果を考慮した下水管渠の運動方程式および連続式と、マンホールの連続式により、次のように表される。

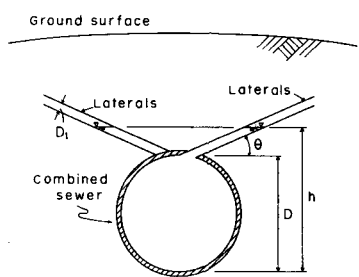


図-1 下水管渠と取付管

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{c'^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \dots (2)$$

$$; c' = \sqrt{g \frac{L}{N} (\sin \theta) \frac{A_p}{A_l}} \dots (3)$$

$$F (dh_M / dt) = \Sigma Q_{in} - \Sigma Q_{out} ; F \begin{cases} = F_M & (h_M < h_G \text{ のとき}) \\ = F_G & (h_M \geq h_G \text{ のとき}) \end{cases} \dots (4)$$

ここに、V: 断面平均流速、h: 管渠底から測った圧力水頭、R: 径深、c': 取付管が接続する下水管渠の圧力波伝播速度、S_o, n, L, A_p: 下水管渠の勾配、Manning の粗度係数、長さ、断面積、A_l, N, θ: 取付管の断面積、接続本数 (L 当たり)、接続角度、h_M, F_M, ΣQ_{in}, ΣQ_{out}: マンホールにおける水深、断面積、流入流量の合計、流出流量の合計、h_G: マンホール深、F_G: マンホールを囲むはんらん域面積、g: 重力加速度、x: 距離、t: 時間。

(b) 取付管の圧力解放効果と圧力波伝播速度

上式 (1)～(3) により表される下水管渠のサーチャージ流れは、以下のような圧力波の伝播特性をもつ。

① 下水管渠の圧力波は、従来³⁾、管壁と水の弾性変形効果に起因する弾性波としての圧力波として捉えられていたが、実際は、取付管の圧力解放効果 (貯留作用) に起因する重力波としての圧力波である。

② 圧力波伝播速度 c' は、下水管渠と取付管の現地諸量 L/N, θ, A_p/A_l によって式 (3) のように定義される。

③ L/N, θ, A_p/A_l の実流域での調査結果と式 (3) より、c' は、一般に、下水管渠径 D のべき関数として表され (図

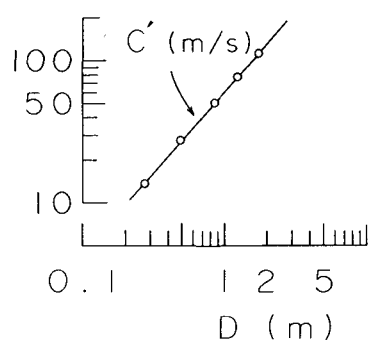


図-2 c' ～ D の関係

-2), 弾性波としての圧力波伝播速度 a の 1,000 m/sec 前後に対し、10～100 m/sec 程度となる。

2.2 マンホールの圧力解放効果を組み入れた流れの基礎式と圧力波伝播速度⁴⁾

(a) 基本概念

下水管渠に接続する取付管は、サーチャージ流れに対して予想外に大きい圧力解放効果を及ぼし、圧力波の伝播速度をかなり小さい（ a に比べて）ものとしている。これより、取付管の 数10～数100 倍の断面積をもつマンホールが取付管と等価な圧力解放効果を及ぼしているであろうことは、十分に予測され得る。ところで、マンホールの圧力解放効果は、実は、上記の流れの基礎式 (1)～(4) を連立させた解析結果の中に必然的に反映されているはずである。しかし、こうした個々の解析から、圧力解放効果の一般的な特性を引き出すことは困難である。そこで、幾つかの仮定を行って後、取付管とマンホールの両者の圧力解放効果を普遍的に評価しえる下水管渠網の流れの基礎式について考察する。

(b) 流れの基礎式

はじめに、次の仮定をおく（図-3）。

① マンホールは 数10～数100 本の取付管の集合体に置き換えて考えることができる。

② マンホール地点の取付管を全て下流側の下水管渠へ（見掛け上）付け替えても、上流マンホール地点を含む下水管渠の L 区間におけるサーチャージ流れの伝播特性は変化しない。

③ すなわち、 L 区間内における取付管の場所的な不均一性が流れの伝播特性に及ぼす影響は、実用上からは無視し得る。

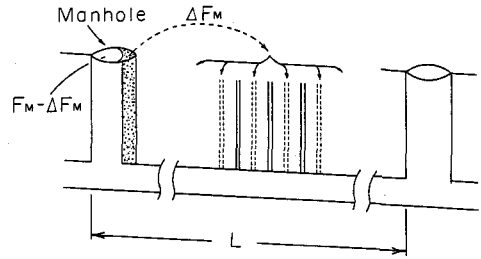


図-3 上流マンホールの下水管渠への付け替え

上流マンホール地点の取付管を全て下流側の下水管渠に付け替え、この下水管渠の微小区間に運動の第2法則と質量保存則を適用すると、下水管渠の流れの基礎式 (5) および (6) を得る（運動方程式は前記の式 (1) と同一）。また、マンホールにおける連続式は、式 (7) のように表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{c'^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \cdots \cdots (5) \quad ; \quad c'' = \sqrt{g \frac{L \cdot A_p}{F_M + N (A_l / \sin \theta)}} \quad \cdots \cdots (6)$$

$$\Sigma Q_{in} - \Sigma Q_{out} = 0 \quad \cdots \cdots (7)$$

ここに、 c'' ：マンホール地点の取付管が全て付け替えられているときの下水管渠の圧力波伝播速度。

(c) 取付管・マンホールの圧力解放効果と圧力波伝播速度

マンホール地点の取付管が全て付け替えられている下水管渠において、その付け替えられた取付管だけが存在する（あるいは、実在する取付管を全て取り除いた）と仮定するときの、下水管渠の圧力波伝播速度を c'_M と定義する。すなわち c'_M は、マンホールの圧力解放効果に起因する圧力波伝播速度を表すことになる。定義により、 c'_M は次式のように表される。

$$c'_M = \sqrt{g (L A_p / F_M)} \quad \cdots \cdots (8)$$

上の c'_M と式 (3) の c' を用いると、 c'' （式 (6)）は次のように書き換えられる。

$$c'' = (c' \cdot c'_M) / \sqrt{c'^2 + c'^2_M} \quad \cdots \cdots (9)$$

上式は、任意の下水管渠（上流マンホールを含む）における圧力波伝播速度は、実在する取付管による本来の圧力波伝播速度 c' と、マンホールより付け替えられた見掛け上の取付管による圧力波伝播速度 c'_M の関数として表されることを示している。

ここで、 c' および c'_M の c'' に対する寄与率を、それぞれ $P_{c'}$ および $P_{c'_M}$ と表す。ここに寄与率とは、 c' と c'_M がそれぞれ同じ割合だけ変化するときの、 c'' の変化分に占める（寄与する） c' と c'_M の割合である。これより、寄与率 $P_{c'}$ および $P_{c'_M}$ は、次式のように表される。

$$P_{c'} = \frac{(c''/c')^2}{(c''/c')^2 + (c''/c'_M)^2} \cdots (10), \quad P_{c'_M} = \frac{(c''/c'_M)^2}{(c''/c')^2 + (c''/c'_M)^2} \cdots (11)$$

松山市公共下水道の管渠網を対象に、1,500組の下水管渠とその上流マンホールを任意に抽出し c'_M を調査した(図-4)。これより、 c'_M も c' と同様に、一般に、 D のべき関数として表される。これと c' を式(10)および(11)に代入し、 $P_{c'}$ と $P_{c'_M}$ を算定した結果を図-5に示す。これより、下水管渠網における圧力波の伝播特性について、次の興味ある知見が得られた。

① 下水管渠網における圧力波の伝播特性は、マンホールの圧力解放効果に起因する伝播速度 c'_M によって80~95%程度支配されている。

② したがって、たとえば SWMM-EXTRAN⁵⁾ では、通常のマンホールは断面積 F_M をもたない($F_M=0$)として取り扱っているが、こうした場合には、解析結果に致命的な誤差が引き起こされる可能性がある。

③ 一方、実在する取付管の圧力解放効果に起因する伝播速度 c' が下水管渠網の圧力波伝播特性に寄与する割合は小さく、5~10%程度にとどまる。

3. サーチャージ流れの実用的な流出シミュレーション法⁴⁾

上述したマンホールの圧力解放効果を下流側の下水管渠に分散させる手法を応用する。今、上流マンホール地点の一部の取付管を、下流側の下水管渠に付け替えるとする(図-3参照)。このとき、下水管渠における運動方程式と連続式、ならびにマンホールにおける連続式は、次のように表される(運動方程式は式(1)と同一)。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{(c')^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \cdots (12)$$

$$; (c')' = \sqrt{g \frac{L A_p}{\Delta F_M + N (A_1 / \sin \theta)}} \cdots (13)$$

$$(F_M - \Delta F_M) \cdot (dh_M / dt) = \Sigma Q_{in} - \Sigma Q_{out} \cdots (14)$$

ここに、 ΔF_M ：下流側の下水管渠に付け替えるマンホール地点の取付管の合計面積、 $(c')'$ ：マンホール地点の取付管が付け替えられた下流側の下水管渠における圧力波伝播速度。

図-6は、マンホール地点の取付管の付け替え割合 $\Delta F_M / F_M$ と下水管渠の圧力波伝播速度 $(c')'$

との関係を表している。これより、 $\Delta F_M / F_M = 1$ の場合、下水管渠の圧力波伝播速度は、本来の値の $1/3 \sim 1/5$ 程度まで小さく設定して取り扱えることになる。なお本法を実用するに際し、通常は、 $\Delta F_M / F_M$

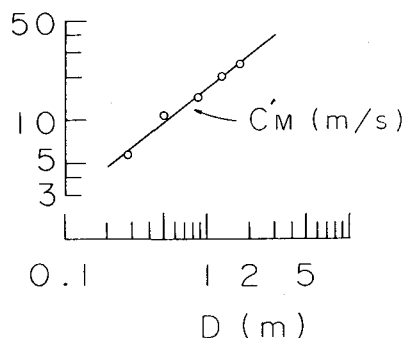


図-4 $c'_M \sim D$ の関係

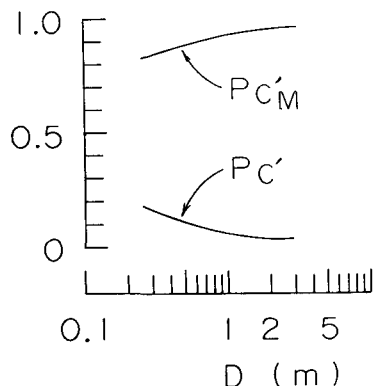


図-5 寄与率 $P_{c'}$ と $P_{c'_M}$

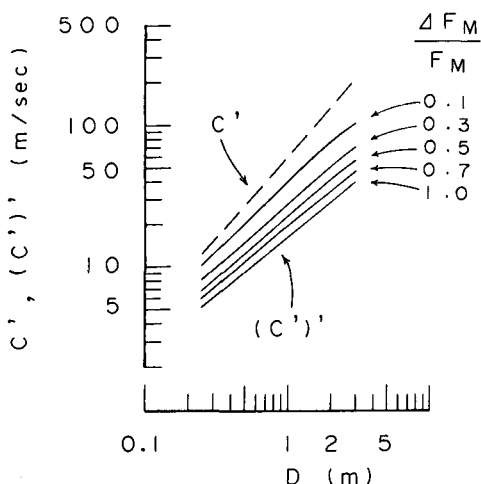


図-6 $c' \sim D$ と $(c')' \sim D$ の関係

= 1 の場合を取り扱うことになる。

4. 実験的・数値的検討

4.1 流出実験⁶⁾

(a) 水理模型の概要⁷⁾

下水管渠システムの水理模型を図-7に示す。本模型は透明アクリル製で、直径 10 cm の下水管渠（全長およそ 10 m）、内径 15 cm のマンホール（3箇所）、および内径 1 cm の取付管（0～41 本）からなる。

下水管渠底の 5箇所（No. ①～⑤）

に圧力センサーが取り付けられており、圧力水頭の変動がデータ・レコーダに記録される。なお、マンホールは取り外しが可能であり、取付管のみに着目した流出実験も行うことができる。

(b) 圧力解放効果と圧力波伝播速度

i) 取付管およびマンホールの圧力解放効果と圧力波伝播速度に関する実験；管渠システム内をはじめ静水状態に保っておき、上流（下流）端貯水槽の水位を急上昇させて、水位擾乱が管渠システム内を伝播する状況を発生させた。各圧力センサー地点で記録された水位上昇ハイドログラフより、種々の水位上昇量 Δh について、これらが伝播する速度（圧力波伝播速度）を測定した。これら測定値と式 (3) あるいは (6) で示される圧

力波伝播速度の理論値（ c' あるいは c'' ）を対比した。1 例を図-8（マンホールが設置されている場合）に示す。水位上昇の初期（ Δh が小さい範囲）では、取付管内およびマンホール内の水塊の加速度が影響し、測定値が理論値を大きく上回っている。しかし初期を過ぎると、測定値と理論値はよく一致している。これらの結果は、式 (3) および (6) により、下水管渠網における圧力波の伝播特性（圧力波伝播速度）を精度高く評価しえることを示している。

ii) 実用的な流出シミュレーション法に関する流出実験；マンホール地点の取付管の一部あるいは全部を下水管渠に付け替えてその圧力波伝播速度 c' を見掛け上小さく設定しえる手法を利用した流出シミュレーション法（図-9(a) の adjusted）と、こうした付け替えを行うことなく単に下水管渠の c' を強制的に小さく設定する従来の流出シミュレーション法（図-9(b) の Non-adjusted）を流出実験に適用し、両シミュレーション法による結果を実験結果と対比した。下水管渠システム下流端における流量調整運転を想定した流出実験に対する検討例を、図-9 に示す。これらより、提案した手法を用いれば、従来の 3～5 倍程度大きい計算時間間隔を採用し、かつ解析精度をほとんど低下させることなく流出シミュレーションを遂行しえることが確かめられた。

4.2 数値実験⁴⁾

都市域の下水管渠網でみられる標準的な諸量をもつ 3 タイプのプリズマチックな管渠システムを対象に、地表面はらんの発生する出水を含む 3 種の出水について、それぞれ流出シミュレーションを行い、上述の

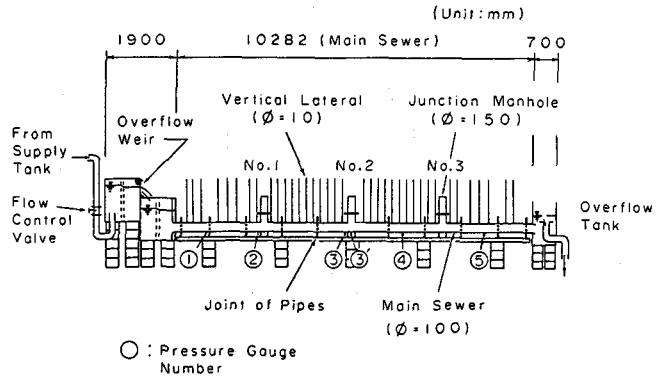


図-7 水理模型の概要

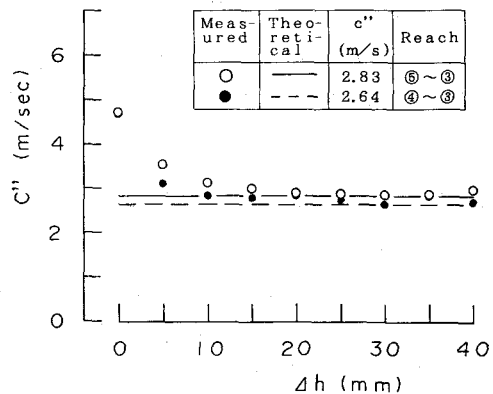
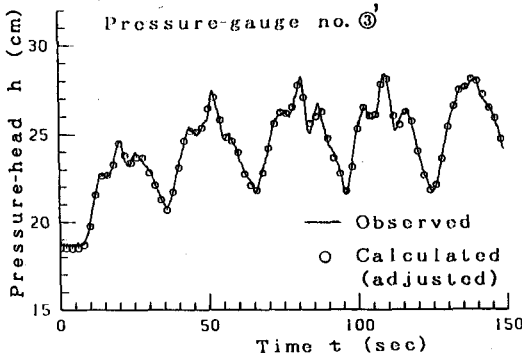
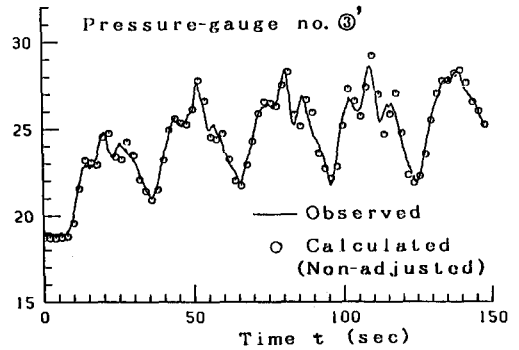


図-8 c'' の測定値と理論値の比較



(a) マンホールの圧力解放効果を
利用する場合



(b) マンホールの圧力解放効果を
利用しない場合

図-9 実用的な流出シミュレーション法の適用性 ($\Delta F_M/F_M=1$, $c''=3.04$ m/s)

流出実験と同様の検討を進めた。ここでは、紙数の関係で、流出実験において確認された本手法の有用性が、本実験によっても確かめられていることを述べるにとどめる。

5. 結 論

本論文では、下水管渠網に多数存在するマンホールの圧力解放効果に着目し、サーチャージ流出を実用的に解析しえる手法について、理論的・実験的な検討を進めた。

はじめに、マンホールの圧力解放効果にもとづく圧力波の伝播特性を評価する式を理論的に導出した。これより、下水管渠網における圧力波の伝播特性は、その大部分が、マンホールの圧力解放効果によって支配されている新しい知見を明らかにした。次に、マンホールの圧力解放効果を下流側の下水管渠に分散させ、見掛け上、下水管渠の圧力波伝播速度をかなり小さく設定しえる手法を考案し、これを利用した実用的な流出シミュレーション法を提示して、数値的・実験的な検討を進めた。その結果、本手法を用いれば、解析精度を低下させることなく、かつ従来の3～5倍程度大きい計算時間間隔を用いたサーチャージ流出解析を遂行しえることが確かめられた。

参 考 文 献

- 1) 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渠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.
- 2) 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，Vol. 8，No. 2，pp. 9～22，1989.
- 3) Chaudhry, M. H. : Applied Hydraulic Transients, VNR Company, pp. 426～431, 1979.
- 4) 山内武志・川裾利雄・渡辺政広：下水道管渠網におけるサーチャージ流出のシミュレーション法について，土木学会第44回年次学術講演会概要集，第2部，pp. 150～151，1989.
- 5) Roesner, A. L. et al. : Storm Water Management Model User's Manual Version 3, Addendum 1, EXTRAN, Report No. EPA-600/2-84-109b, 1984.
- 6) 渡辺政広・山内武志・小池英仁：取付管の調圧効果を考慮したサーチャージ流れの水力模型実験，第41回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集，pp. 88～89，1989.
- 7) 渡辺政広・竹内 明・川裾利雄：取付管の調圧効果を考慮した下水道管渠網の雨水流出モデル，第33回水力講演会論文集，pp. 157～162，1989.