

## 都市下水道管渠網の空気圧縮を伴う雨水流出モデルに関する研究

中電技術コンサルタント 正会員 ○佐々木悠平 南海測量設計 正会員 坂本健一  
南海測量設計 正会員 友近榮治 愛媛大学大学院 フェロー 渡辺政広

## １．はじめに

近年、各地の都市流域で、局地的集中豪雨が頻繁に発生し、短時間強雨がしばしば現れるようになっている。こうした強雨時には、計画を大きく上回る雨水が下水道管渠網内にきわめて急激に流入し、管渠網内の空気圧が高まることによる、マンホール蓋の浮上・飛散現象が発生している。

本報告では、空気圧の時空間的变化と取付管およびマンホール蓋空気孔からの吸排気を考慮した雨水流出モデルを提案し、下水道模型管渠を用いた雨水流出実験の結果との比較による本モデルの適用性の検討を行った結果を述べる。

## ２．下水道管渠網における空気・雨水の二層流の基礎式と数値解析法

上述した空気の時空間的变化と、取付管およびマンホール蓋空気孔からの吸排気を考慮して、空気と雨水の流れの各基礎式を導出した。まず空気の流れは等エントロピー流れと考えて、取付管からの吸排気を考慮した下水道管渠部における空気の流れの基礎式（連続式および運動方程式）、およびマンホール蓋空気孔からの吸排気を考慮したマンホール部における流れの基礎式（空気の流れの質量保存則、圧縮性の式、全水頭の式）を導出した。次に、下水道管渠網における空気圧の時空間的变化を考慮して、下水道管渠部とマンホール部における雨水の流れの基礎式（連続式および運動方程式）を導出した。ここでは、紙数制限のため、下水道管渠部における空気の流れの基礎式についてのみ記述する。

$$\frac{p_a}{\rho_a^\gamma} = \frac{p_0}{\rho_0^\gamma} \quad (1), \quad \frac{\partial(\rho_a A_a)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_a A_a V_a)}{\partial x} + m' = 0 \quad (2), \quad \frac{\partial V_a}{\partial t} + V_a \frac{\partial V_a}{\partial x} + \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p_a}{\partial x} + f_D \frac{1}{4R_a} \frac{1}{2} [V_a |V_a - \frac{m' V_a}{\rho_a V_a}] = 0 \quad (3)$$

$$; \left\{ \begin{array}{l} f_D = 64/R_e \text{ (層流)}, \quad f_D = 4 \times 0.0625 \left[ \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3.7 \times 4R_a} + \frac{5.74}{R_e^{0.9}} \right) \right]^2 \text{ (乱流)}, \quad R_e = \frac{4R_a V_a}{\mu_a / \rho_a}, \quad m' = m / \Delta x, \\ m = C_m \rho_a F_l \left( \frac{p_0}{p_a} \right)^{1/\gamma} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{p_a}{\rho_a} \left\{ 1 - \left( \frac{p_0}{p_a} \right)^{\gamma-1/\gamma} \right\}} \text{ (排気)}, \quad m = -C_m \rho_a F_l \left( \frac{p_a}{p_0} \right)^{1/\gamma} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left\{ 1 - \left( \frac{p_a}{p_0} \right)^{\gamma-1/\gamma} \right\}} \text{ (吸気)} \end{array} \right.$$

ここに、 $\rho_a$ ：空気の密度、 $p_a$ ：空気の圧力、 $\rho_0$ ：大気の密度、 $p_0$ ：大気の圧力、 $\gamma$ ：比熱比(=1.4)、 $A_a$ ：空気の流れの断面積、 $V_a$ ：空気の流速、 $R_a$ ：径深、 $f_D$ ：摩擦損失係数、 $\varepsilon$ ：管壁の粗度高さ、 $R_e$ ：レイノルズ数、 $\mu_a$ ：空気の粘性係数、 $m'$ ：管渠単位長さあたりの空気の排気質量流量、 $\Delta x$ ：計算距離さざみ、 $m$ ：空気の排気質量流量、 $C_m$ ：流量係数、 $F_l$ ： $\Delta x$ 区間内の取付管の総断面積、 $t$ ：時間、 $x$ ：距離を表す。

流れの基礎式の数値解析には、数値計算上の安定性に優れ、精度高い解析結果が得られると言われている特性曲線法を用いた。基礎式から導出した特性曲線式および特性方程式の差分化については、2次のオーダーの差分近似を行い、さらに解析精度を上げるために、3回の繰り返し計算を行うこととした。

## ３．下水道模型管渠による雨水流出実験とモデルの適用性の検討

## 3.1 実験概要

実験には、マンホールが2つ取り付けられている透明アクリルパイプ製の下水道模型管渠 No.1 (図-1)、および取付管が7本取り付けられている透明アクリルパイプ製の下水道模型管渠 No.2 (図-2)を用いた。この模型管渠に、ゲートの急閉鎖・急開放による空気圧縮を伴う雨水流出(下水道模型管渠 No.1 には開水路流れ(図-3)、下水道模型管渠 No.2 にはサーチャージ流れ(図-4))を発生させ、下水道模型管渠に取り付けられた圧力センサーにより、空気圧力と水深を測定した。ここで、図-4の実線は全水頭(=水位+空気圧水頭)を、破線は水位

を表している。なお数値計算には、得られた水面変動記録を内部境界条件として与えた。

### 3.2 流出実験結果とモデルの適用性に関する検討

#### (1) 開水路流れ

開水路流れの雨水流出実験について、計算結果を実測結果と対比して図-5 に示す。計算結果は実測とやや異なる変動を示しているものの、実測結果に見られる急激な空気圧の上昇・低下などの時間的な変動特性をよく再現できているといえる。

#### (2) サーチャージ流れ

サーチャージ流れの雨水流出実験について、計算結果を実測結果と対比して図-6 に示す。実測値は、 $t=7.8s$  で水面が管頂に達しているため、青破線で示す  $t=7.8s$  より前の時間は空気圧を、後の時間は全水頭を表している。 $t=7.8s$  以前の空気圧の比較から、計算値は、実測値をよく再現できているといえる。

#### 4. おわりに

本報告では、はじめに、空気圧の時空間的变化と取付管およびマンホール蓋空気孔からの吸排気を考慮した雨水流出モデルを提案した。次に、開水路流れとサーチャージ流れの2パターンの流出実験より、提案したモデルの適用性の検討を行い、実用上、適用可能であるとの見通しが得られた。

#### 参考文献

- 1) 松尾一泰: 圧縮性流体力学, 理工学社, pp. 48-65, 1999.
- 2) Oosthuizen, P. H. and Carscallen, W. C. : Compressible fluid flow, McGraw-Hill, pp. 226-237, 1997.

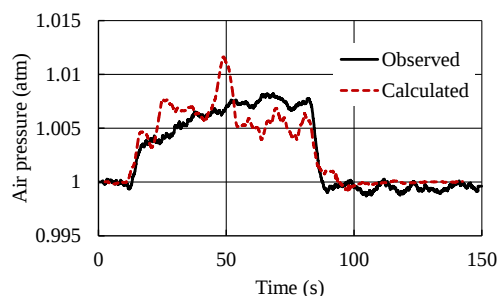


図-5 空気圧ハイドログラフの比較  
(開水路流れ・Sensor No. 2)

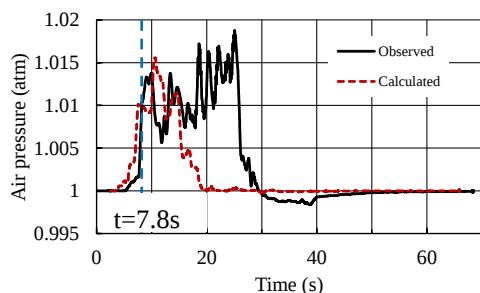


図-6 空気圧ハイドログラフの比較  
(サーチャージ流れ・Sensor No. 6)

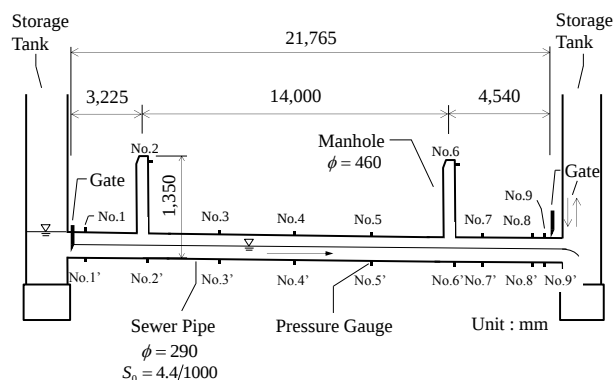


図-1 下水道模型管渠 No. 1

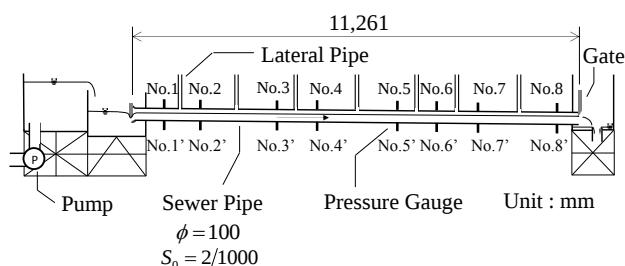


図-2 下水道模型管渠 No. 2

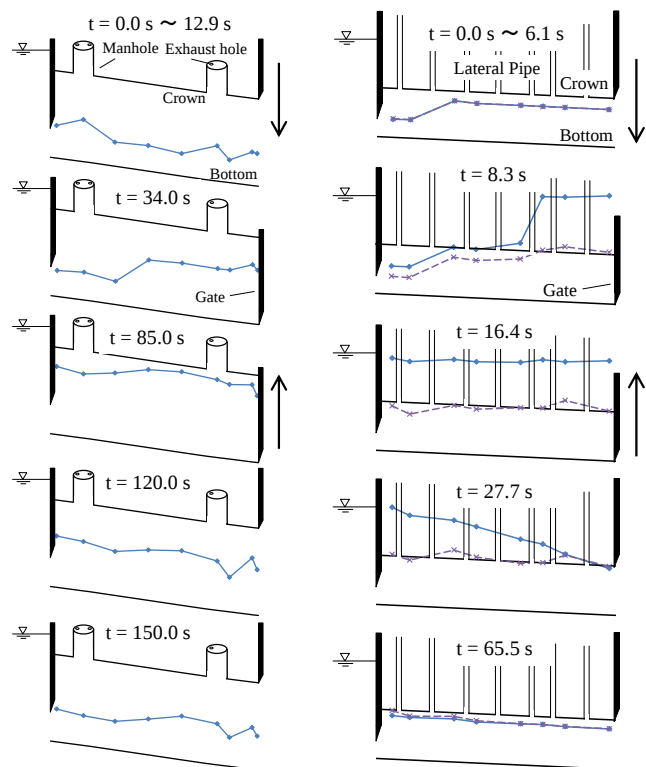


図-3 水位の時間的変化  
(開水路流れ)

図-4 水位・全水頭の時間的変化  
(サーチャージ流れ)