Y1510-01
0914-6253/16/¥500/論文/JCOPY

特集

混相流に見るフルードパワー②

都市下水道管渠網の空気圧縮を伴う豪雨シミュレーションモデル

Storm water runoff simulation model with manhole cover's blowing and air compression in urban drainage sewer pipe systems

㈱NJS　東　正史

1 はじめに

近年、いわゆるゲリラ豪雨や台風などの大雨による浸水氾濫災害がたびたび発生している。こうした大雨時の下水道管渠システムの雨水流出においては、管渠への雨水流入量増大による水位上昇に伴って管渠内及びマンホール内の空気が圧縮され、マンホール蓋が飛散する現象や、取付管を通じて管渠内の雨水が排水設備へ吹き上げたり、逆流したりする現象が発生している。こうした流出現象を解明することが課題となっており、下水道管渠の空気圧縮を伴う雨水流出解析モデルの開発が急務と言われてきている。

本稿では、管渠内及びマンホールでの空気の圧縮を考慮した下水道管渠システムの雨水流出モデルを提案している。空気の流れは等エントロピー流れであり、取付管とマンホールふた空気孔を通じて吸排気が行われ、下水道管渠内及びマンホール部分における空気の流れの運動方程式と連続の式をそれぞれ導出している。また、下水道管渠内の空気圧が時間空間的に変化することを考慮し、下水道管渠の雨水の流れの基礎式を導出している。次に、本モデルを下水道模型管渠における流出実験に適用し、本モデルによる流出シミュレーションから得た下水道管渠内の空気圧ハイドログラフを実測結果と対比して、本モデルの適用性を検討している。

2 下水道管渠網における雨水・空気の二層流の基礎式

上述した空気圧の時空間的変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、雨水と空気の流れの基礎式を導出した。ここでは、紙数制限のため、空気の流れの基礎式のみを記述する。

空気の流れは、等エントロピー流れであるとする。また、管渠網内の空気は、取付管やマンホール蓋空気孔を通して吸排気されていることを考慮する。

（1）管渠における空気の流れの基礎式

第1図に示す下水道管渠の微小区間の空気の流れに、質量保存則と運動量の定理を適用すると、連続の式(1)と運動方程式(2)を得る。

〈連続の式〉

$$A_a\frac{\partial \rho_a}{\partial t}+\rho_a\frac{\partial A_a}{\partial t}+\rho_a A_a\frac{\partial V_a}{\partial x}+\rho_a V_a\frac{\partial A_a}{\partial x}+A_a V_a\frac{\partial \rho_a}{\partial x}+m'=0 \quad \cdots(1)$$

〈運動方程式[(1)~(3)]〉

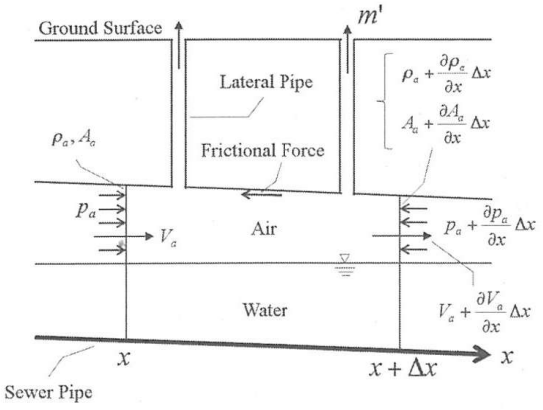
$$\frac{\partial V_a}{\partial t}+V_a\frac{\partial V_a}{\partial x}+\frac{1}{\rho_a}\frac{\partial p_a}{\partial x}+f_D\frac{1}{4R_a}\frac{1}{2}|V_a|V_a-\frac{m'V_a}{\rho_a A_a}=0 \quad \cdots(2)$$

$$
\begin{cases}
f_D = 4\times 0.0625 \Big/ \left[\log_{10}\left(\dfrac{\varepsilon}{3.7\times 4R_a}+\dfrac{5.74}{R_e^{0.9}}\right)\right]^2 \\
\text{(乱流)、}\ f_D = 64/R_e \quad \text{(層流)、}\ R_e = \dfrac{4\times R_a V_a}{\upsilon_a}\text{、} \\
\text{(排気)} \\
m = C_m \rho_a F_l \left(\dfrac{p_0}{p_a}\right)^{1/\gamma} \sqrt{\dfrac{2\gamma}{\gamma-1}\dfrac{p_a}{\rho_a}\left\{1-\left(\dfrac{p_0}{p_a}\right)^{\gamma-1/\gamma}\right\}}\text{、} \\
\text{(吸気)} \\
m = -C_m \rho_0 F_l \left(\dfrac{p_a}{p_0}\right)^{1/\gamma} \sqrt{\dfrac{2\gamma}{\gamma-1}\dfrac{p_0}{\rho_0}\left\{1-\left(\dfrac{p_a}{p_0}\right)^{\gamma-1/\gamma}\right\}} \\
m' = m/\Delta x
\end{cases}
\quad \cdots(3)
$$

〈等エントロピー流れの式〉

$$
\frac{p_a}{\rho_a{}^{\gamma}} = \frac{p_0}{\rho_0{}^{\gamma}} \quad \cdots(4)
$$

ここに、A_a：空気の流れの断面積、ρ_a：空気の密度、V_a：空気の流速、p_a：空気の圧力、m'：管渠単位長さ当たりの空気の吸排気質量流量、p_0：大気の圧力、ρ_0：大気の密度、C_m：流量係数、f_D：摩擦損失係数、R_e：レイノルズ数、R_a：径深、ε：管壁の粗度高さ、υ_a：空気の動粘性係数、F_l：Δx区間内の取付管の総断面積、γ：比熱比(=1.4)、Δx：計算距離きざみ、t：時間、x：距離。



第1図　下水道管渠の微小区間における空気の流れ

(2) マンホールにおける空気の流れの基礎式

第2図に示すようにマンホールでは、マンホール内空気圧と大気圧の大小関係により、マンホール蓋に設けられている空気孔を通じて、吸気、排気が行われる。

〈連続の式〉

$$
F_M \frac{d}{dt}\left\{\rho_M (h_G - h_M)\right\} = A_{a\,u}\rho_M V_{a\,u} - A_{a\,d}\rho_M V_{a\,d} - m_M \quad \cdots(5)
$$

〈吸排気質量流量の式[2][3]〉

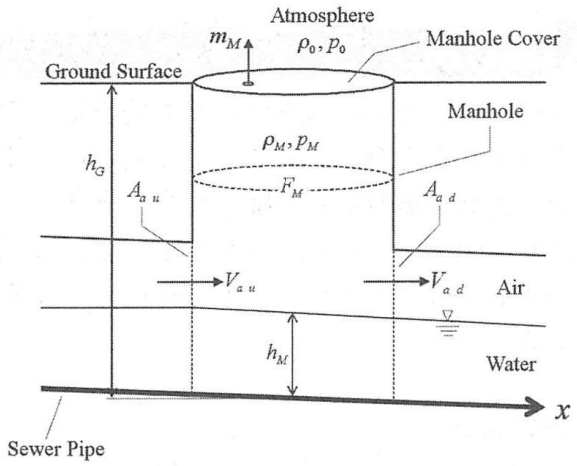
$$
\begin{cases}
\text{(排気)} \\
m_M = C_m \rho_M F_A \left(\dfrac{p_0}{p_M}\right)^{1/\gamma} \sqrt{\dfrac{2\gamma}{\gamma-1}\dfrac{p_M}{\rho_M}\left\{1-\left(\dfrac{p_0}{p_M}\right)^{\gamma-1/\gamma}\right\}} \\
\text{(吸気)} \\
m_M = -C_m \rho_0 F_A \left(\dfrac{p_M}{p_0}\right)^{1/\gamma} \sqrt{\dfrac{2\gamma}{\gamma-1}\dfrac{p_0}{\rho_0}\left\{1-\left(\dfrac{p_M}{p_0}\right)^{\gamma-1/\gamma}\right\}}
\end{cases}
\quad \cdots(6)
$$

ここに、m_M：マンホールからの吸排気質量流量、ρ_M：マンホールにおける空気の密度、h_M：マンホールにおける水深、p_M：マンホールにおける空気の圧力、A_{au}、A_{ad}：上流から流入する管渠、下流へ流出する管渠の空気の流れの断面積、V_{au}、V_{ad}：上流から流入する管渠、下流へ流出する管渠の空気の流れの流速、h_G：マンホール深、F_A：マンホール蓋の空気孔の総断面積、F_M：マンホール水平面積。

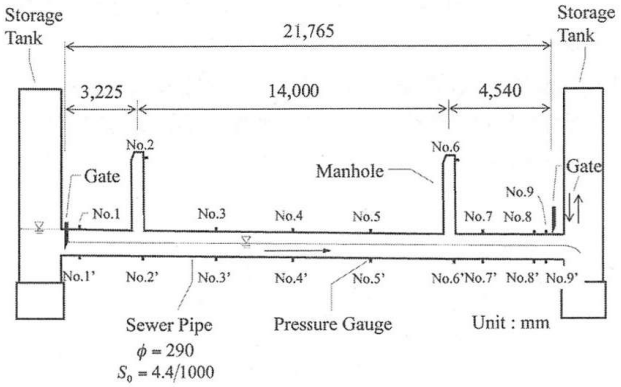
3 流出実験によるモデルの適用性の検討

第3図に示す下水道模型管渠において、空気圧縮を伴う雨水流出実験を行った。この流出実験に本モデルを適用し、本モデルによりシミュレートされた空気圧ハイドログラフを実測結果(空気圧ハイドログラフ)と対比して、本モデルの適用性を調べた。

なお、はじめにも述べたように、下水道模型



第2図　マンホールにおける空気の流れ



第3図　下水道模型管渠

管渠で出現させた雨水流出は、非定常開水路流れである。また、本モデルは空気の流れのモデルと雨水の流れのモデルから構成されているが、本モデルの適用性の検討にあたり、(雨水の流れのモデルの適用性は既に確認されており）空気の流れのモデルの解析精度を調べる必要があったため、流出シミュレーションに当たっては、実測の水面変動記録を内部境界条件として与えている。

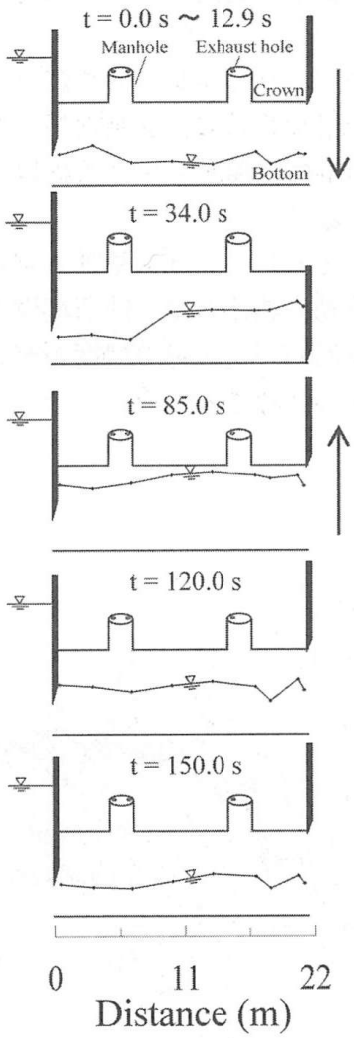
3−1　下水道模型管渠

下水道模型管渠は、第3図に示すように、透明アクリルパイプ製で、管渠総延長は約22m、管渠直径は29cm、勾配は4.4/1,000、粗度係数は0.010m$^{-1/3}$·sである。マンホールは、内径46cm、深さ1.35mの透明アクリルパイプ製で、2カ所に取り付けられている。また、マンホール蓋には、直径1.3cmの空気孔が最大4孔、設けられるようになっている。取付管は、直径5cm、長さ1.50mの透明アクリルパイプ製で、最大、12ヶ所に取り付け可能である。なお、本模型管渠は、㈱G&U技術研究センター（埼玉県比企郡川島町大字吹塚732-157）に設置されているものである。

3−2　流出実験と適用性に関する考察

(1) 流出実験

下水道模型管渠において、第4図に示すような、空気圧縮を伴う雨水流出の実験を行った。実験手順（内容、条件）を示すと、①初期の流れは、上流部で跳水を伴うやや複雑な様相を呈している開水路の不等流流れである、②ここに、管渠システムの上流端では、Q=16.7l/sの流量が、ゲートを通じて潜り状態で流入している、③t=12.9sにおいて下流端のゲートを急閉塞（完全閉鎖）する、④サージとバックウォー



第4図　流出期間中の水面形の時間的変化

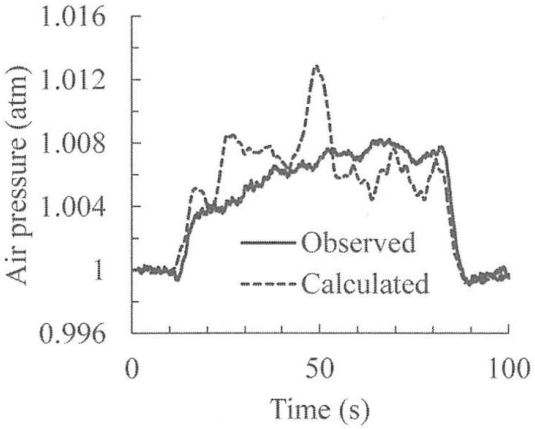
ターが、管渠システム内の空気を圧縮しかつ上流へと押しやりながら、上流へ向けて伝播してゆく、⑤この間、圧縮された管渠システム内の空気は、取付管やマンホール蓋空気孔を通じて大気中へと排気される、⑥サージとバックウォーターが管渠システムの上流端に到達するとき(t=85.0s)、ゲートを急開放（完全開放）する、⑦管渠システム内に貯留されていた流出水は下流端に向かって流出し続ける、⑧この間、管渠システム内に取付管やマンホール蓋空気孔を通じて吸気がなされ、また管渠システムの下流端では管渠内空気が大気中へと排気される、⑨この後、管渠内空気圧、雨水流出はともに初期の大気圧、定常不等流流れに戻る。

(2) 流出実験結果と適用性に関する考察

空気圧ハイドログラフについて、流出シミュレーション結果と実測結果を対比して、第５図に示す。

第５図より、シミュレートされたハイドログラフは、実用上からは、実測結果に見られる時間的変動の特性（傾向）をよく再現できていることが分かる。

なお、シミュレーション結果に見られる大きな変動（振動、誤差）は、内部境界条件として用いた水面形の測定記録の精度が充分で無かったことによると考えられる。



第5図　空気圧ハイドログラフの比較（センサーNo.2地点）

4 おわりに

本稿では、空気圧縮を伴う下水道管渠の雨水流出モデルを提案し、本モデルが実用しえることを、流出実験を行って確認した。今後は、水の流れと空気の流れを一体的に解析し、実流域への適用ができるようモデルの改良を図る必要がある。

＜参考文献＞

(1) Oosthuizen P.H. and Carscallen W.E., *Compressible fluid flow*,. McGraw-Hill, p.230（1997）
(2) 松尾一泰：圧縮性流体力学、理工学社、pp.142-149（1999）
(3) 渡辺政広・神田徹・田中祐大・神吉和夫：マンホール蓋飛散の水理解析モデルと水理模型実験、水工学論文集、第45巻、pp.907-912（2001）

筆者紹介

東　正史

㈱NJS　東部支社
東京総合事務所設計一部
グループリーダー

〈主なる業務歴および資格〉
平成9年4月㈱NJS入社、現在に至る。下水道計画設計を中心に、下水道施設（管路、ポンプ場、処理場、貯留施設等）の調査、計画、設計等に従事。
博士（工学）（愛媛大学）、技術士（総合技術監理部門、上下水道部門、衛生工学部門）、上級土木技術者（環境、流域・都市、防災）。
〈会社の主な事業内容〉
上水道・工業用水道・下水道施設等の調査・計画・設計・監理及び耐震診断、経営（財政）、水質管理及び維持管理のコンサルティング、アセットマネジメント業務、防災関連調査・対策・計画業務など。