

### 下水道管渠の圧力（満管）流れの基礎式と圧力波伝播速度

日本上下水道設計(株) 正会員○東 正史  
愛媛大学大学院 学生員 スエータ・シジャパティ  
愛媛大学大学院 正会員 渡辺 政広

#### 1. はじめに

近年、都市の下水道流域では、いわゆるゲリラ豪雨などにより、浸水氾濫災害が頻繁に発生している。これら災害を軽減・防止する対策を立案するためには、この浸水氾濫現象を精度高くシミュレートできる流出解析モデルが必要であり、そのようなモデルとして、従前より、InfoWorks モデル、MOUSE モデル、SWMM モデルなどが広く用いられてきている。さて、これらモデルにより流出解析を行う場合の問題点は、圧力波伝播速度（スロット幅）の違いによって浸水氾濫解析結果に大きい違いが現れることがあるにも拘わらず、圧力波伝播速度の評価式が未だに明らかにされていないところにある。

本文では、実流域の下水道管渠システムに多数存在している取付管を考慮し、下水道管渠における非定常圧力流れ（満管流れ）の流れの基礎式（運動方程式、連続の式）と圧力波伝播速度の評価式を導出した。

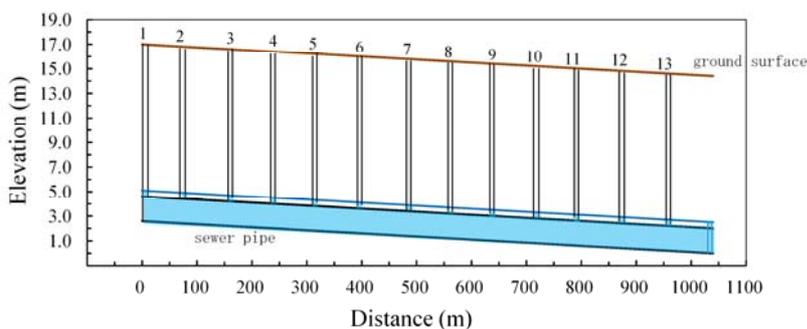


図-1 流出シミュレーションに用いた下水道管渠システム

#### 2. InfoWorks モデルによる 流出シミュレーション

図-1 に示す下水道管渠システム（延長 1,040m, 管径 2m, マンホール径 1.9m, 管渠・マンホール数 13 本, 勾配 0.0025）の初期等流流れ（流量  $7.6\text{m}^3/\text{s}$ ）に、上流端から洪水流入（図-2(a)）を、下流端ではせき上げ背水（図-2(b)）を与え、InfoWorks モデルにより、流出シミュレーションを行った。計算結果の例をを図-2(c), (d)に示す。図-2(c), (d)から明らかなように、圧力波伝播速度の違いにより、流出シミュレーション結果に大きい違いが現れてくること分かる。

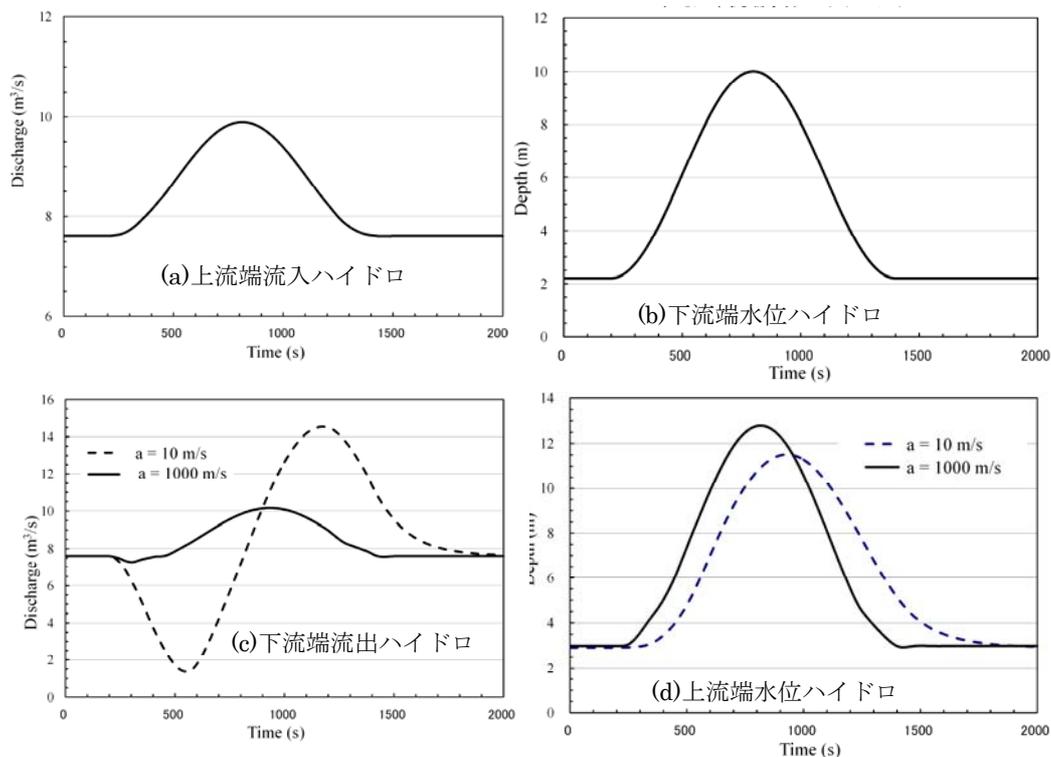


図-2 計算境界条件と流出シミュレーション結果

キーワード 圧力波伝播速度, InfoWorks モデル, スロット・モデル, 非定常圧力流れ, 下水道管渠流出  
連絡先 〒790-8577 松山市文京町 3 番 愛媛大学大学院理工学研究科生産環境工学専攻 Tel./Fax 089-927-9828

3. 下水道管渠網における非定常圧力（満管）流れの基礎式と圧力波伝播速度算定式

水の圧縮性，管壁の弾性変形，および取付管における流出水貯留を考慮して，図-3に示すような，プリズマチックな下水道管渠の微小区間における非定常圧力流れに，質量保存則，運動量の定理を適用し，次の連続式(1)と運動方程式(3)，および圧力波伝播速度の評価式（算定式）(2)を得た。

$$\frac{\partial y}{\partial t} + V \left( 1 - \frac{a^2}{a_L^2} \right) \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \text{or} \quad \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$; a = \frac{a_0}{\sqrt{1 - \frac{gy}{a_0^2} + \frac{a_0^2}{a_r^2} + \frac{a_0^2}{a_L^2}}}, \quad a_0 = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 - \frac{\rho g}{K} y}}, \quad a_r = \sqrt{\frac{\delta E}{\rho D}}, \quad a_L = \sqrt{\frac{g A \sin \theta}{N A_L}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + \frac{n^2 |V| V}{R^{4/3}} = 0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに， $y$ ：水深， $V$ ：断面平均流速， $R$ ：径深， $n$ ：マンニングの粗度係数， $S_0$ ：管渠勾配， $D$ ：管渠径， $A$ ：管渠断面積， $A_L$ ：取付管断面積， $\rho$ ：水の密度， $K$ ：水の体積弾性係数， $\delta$ ：管壁厚， $E$ ：管渠の弾性係数， $N$ ：取付管の管渠単位長さ当たりの接続本数， $a$ ：圧力波伝播速度， $a_0$ ：水の圧縮性に起因する圧力波伝播速度， $a_r$ ：管壁の弾性変形に起因する圧力波伝播速度， $a_L$ ：取付管における流出水貯留に起因する圧力波伝播速度， $g$ ：重力加速度， $x$ ：距離， $t$ ：時間，である。

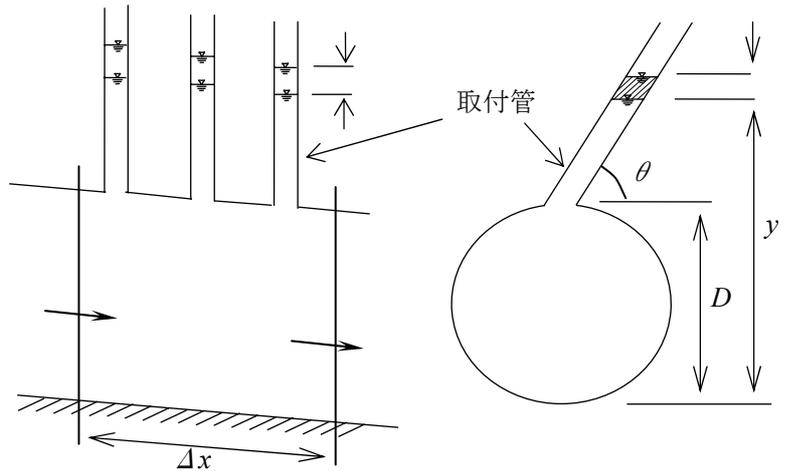


図-3 取付管をもつプリズマチックな下水道管渠の微小区間

4. 実流域の下水道管渠網における圧力波伝播速度

実流域の下水道管渠網（松山市下水道流域，大阪市下水道流域）における圧力波伝播速度（(2)式）を調査した結果を表-1に示す。これより， $a \approx a_L$ であり， $a = 10 \sim 150 \text{ m/s}$ となることが分かる。

表-1 実流域の下水道管渠網における管渠・取付管の諸元と圧力波伝播速度

管渠諸元						計算値			
本管			取付管			$a_0$ (m/s)	$a_r$ (m/s)	$a_L$ (m/s)	$a$ (m/s)
$D$ (m)	$\delta$ (m)	$E$ (N/m <sup>2</sup> )	$d$ (m)	$N$ (本/m)	$\theta$ (度)				
0.25	0.028	28,000	0.15	1/14	25	1,446	1,771	13	13
0.5	0.042			1/17			1,534	28	28
1.0	0.082			1/20			1,515	61	61
2.0	0.145			1/24			1,425	133	132

注) その他共通条件：○水の密度： $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ，○水の体積弾性係数： $K = 2.09 \times 10^9 \text{ (N/m}^2\text{)}$ ，  
○水深： $y = 2 \text{ m}$ ，○管渠の弾性係数： $E = 2.8 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ （鉄筋コンクリート管）