

取付管とマンホールの貯留調圧作用を組み入れた Preissmann Slot Model —NILIM, 海外モデル(MOUSE, InfoWorks, SWMM, etc.) への応用—

(株)荒谷建設コンサルタント 正会員 堀江 展弘

(株)荒谷建設コンサルタント 正会員 白石 央

NPO 法人愛媛県建設技術支援センター・愛媛大学名誉教授 正会員 渡辺 政広

1. はじめに

これまでに提案されてきている Preissmann Slot Model (PSM) による下水道管渠網における流出シミュレーションについては、実用上の立場から、しばしば、スロット幅を人為的に拡張し、より大きい計算時間間隔を採用して流出計算が行われてきているが、こうした場合、たとえば、計算水位ハイドロにおいて、致命的な水位低下の誤差が生ずることがある、などが指摘されている。本文では、こうした課題を解決できる、取付管とマンホールのサーチャージ作用（貯留貯留作用）を組み入れた PSM を提案している。

2. 取付管とマンホールを組み入れた下水道管渠（管水路）非定常流の流れの基礎式

取付管とマンホールを組み入れた下水道管渠（管水路）の非定常流（圧力流れ、満管流れ、サーチャージ流れ）の流れの基礎式（運動方程式、連続の式）は、既に発表¹⁾してきているように、以下のように導出される（図-1）。

ここに、点する取付管は、図-2 に見られるように、これまでの検討により、連続した微小幅スロットに置き換え得るとしている。また、マンホールは、図-3 に示すように、これまでの検討により、その一部を取付管すなわち連続した微小幅スロットとして近傍の管渠に置き換え得るとしている。

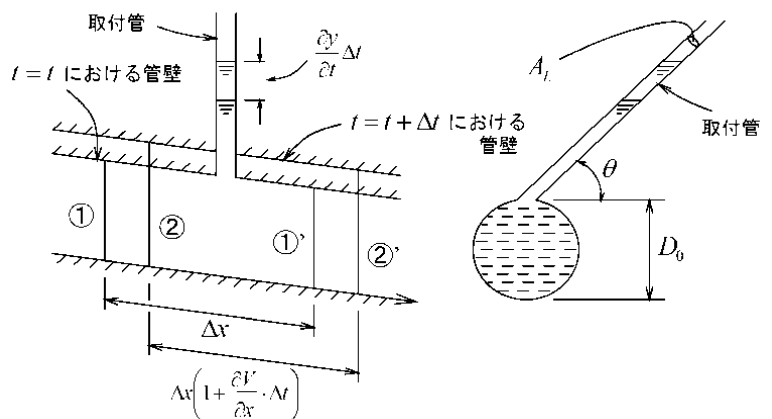


図-1 運動量の定理と質量保存則を適用する微小流体の流れ

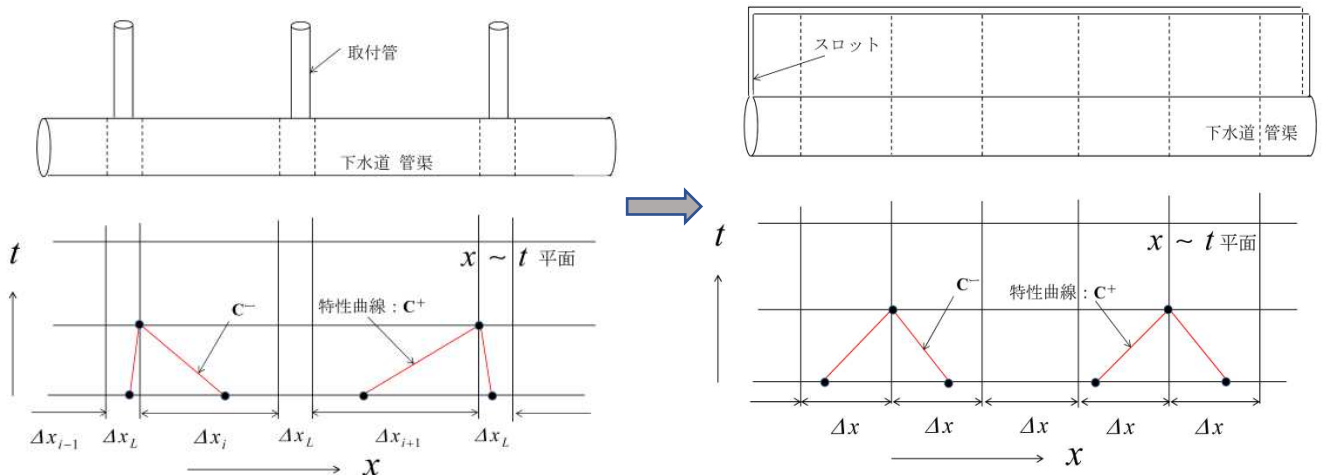


図-2 点する取付管の連続した微小幅スロットへの置き換え

キーワード：Preissmann Slot Model, 取付管, マンホール, 管水路非定常流, サーチャージ流れ

連絡先：〒730-0831 広島市中区江波西 1-25-5 (株)荒谷建設コンサルタント 堀江展弘 Tel 082-234-5663

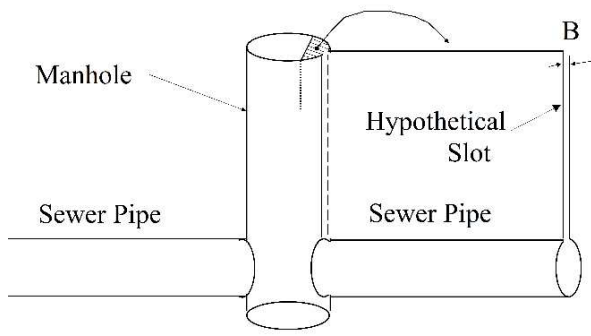


図-3 マンホールの一部を近傍の管渠に
連続したスロットとして付け替える。

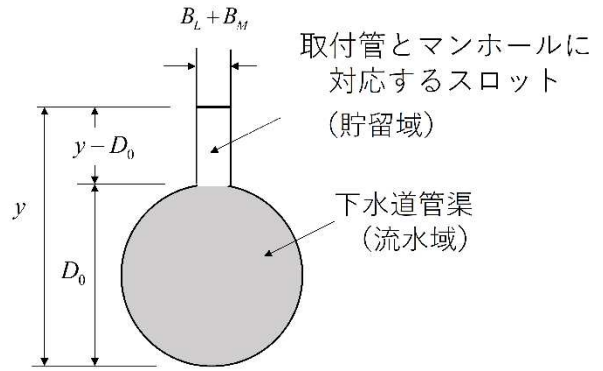


図-4 実流域の下水道管渠の流れは、頂部に貯留域として作用する(取付管とマンホールに対応する)スロットを有する下水道管渠における管水路非定常流であるとしてよい。

運動方程式：

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} - i_0 + \frac{n^2 |V| V}{R^{4/3}} - \frac{V}{gA} \left(A_L \frac{N}{\sin \theta} + \frac{\Delta F_M}{L} + B_L + B_M \right) \cdot \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} - i_0 + \frac{n^2 |V| V}{R^{4/3}} - \frac{V}{gA} (B_0 + B_M + B_L + B_M) \cdot \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

$$A = A_0 + B_r (y - D_0), \quad S = S_0 + 2 \frac{B_r}{D_0} (y - D_0), \quad A_0 = \frac{\pi}{4} D_0^2,$$

$$; \quad S_0 = \pi D_0, \quad B_r = A_0 \frac{D_0}{E \delta} \rho_0 g, \quad B_0 = g(\rho_0 / K) A_0, \quad (2)$$

$$B_L = A_L \frac{N}{\sin \theta}, \quad B_M = \frac{\Delta F_M}{L},$$

連続の式：

$$\frac{\partial y}{\partial t} + V \cdot a^2 \left(\frac{1}{a_r^2} + \frac{1}{a_0^2} \right) \cdot \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} + V \cdot \frac{B_0 + B_r}{B_0 + B_r + B_L + B_M} \cdot \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{A}{B_0 + B_r + B_L + B_M} \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

$$; \quad a = \frac{a_0}{\sqrt{1 + \frac{a_0^2}{a_r^2} + \frac{a_0^2}{a_L^2} + \frac{a_0^2}{a_M^2}}}, \quad a_0 = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}} = \sqrt{g \frac{A_0}{B_0}} \quad (4)$$

$$; \quad a_r = \sqrt{\frac{\delta E}{\rho_0 D_0}} = \sqrt{g \frac{A_0}{B_r}}, \quad a_L = \sqrt{g \frac{A_0}{B_L}}, \quad a_M = \sqrt{g \frac{A_0}{B_M}}$$

ここに、 V ：流速， y ：管渠底から測った水深(圧力水頭)， R ：径深($=A/S$ であり，流水断面積 A ，潤辺 S は式(2)で表される)， i_0 ：管渠こう配， n ：マンニングの粗度係数， A_L ：取付管の断面積， N ：取付管の管渠 1m 当たりの接続本数， θ ：取付管の水平面となす接続角度， ΔF_M ：付け替えるマンホール水平面積の一部， L ：管渠長， ρ_0 ：大気圧下での水の密度， K ：水の体積弾性係数， D_0 ：変形前の(大気圧下での)管渠径， S_0 ： D_0 に対応する(大気圧下での)潤辺， A_0 ： D_0 に対応する(大気圧下での)流水断面積， δ ：管壁の厚さ， E ：管壁材のヤング率， a ：下水道管渠の流れの圧力波伝播速度， a_0 ，

a_r ：水の圧縮性，管壁の弾性変形に起因する圧力波伝播速度， a_L ， a_M ：取付管，マンホールに対応するスロットに起因する圧力波伝播速度， B_0 ， B_r ：水の圧縮性，管壁の弾性変形に起因するスロット幅， B_L ， B_M ：取付管，マンホールに対応するスロット幅， g ：重力加速度， x ：距離， t ：時間。

3. 取付管とマンホールを組み入れた Preissmann Slot Model (PSM) の流れの基礎式

管渠頂部に微小幅($=B_S+B_L+B_M$)のスロットを有する下水道管渠(図-5)のコントロールボリュームを通過する開水路流れに，運動量の定理と質量保存則を適用すると，次の運動方程式(5)と連続の式(6)を得る．ここに，水は非圧縮性で，管壁は弾性変形しないとしている．また， B_S はプライスマン・スロットの幅であるが，この段階では未定である。

運動方程式：

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} - i_0 + \frac{n^2 |V| V}{R^{4/3}} - \frac{V}{gA} (B_S + B_L + B_M) \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

$$; R = A/S, \quad A = A_0 + B_S(y - D_0), \quad S = S_0 + \alpha \cdot (y - D_0)$$

$$\text{連続の式：} \quad \frac{\partial y}{\partial t} + V \frac{B_S}{B_S + B_L + B_M} \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{A}{B_S + B_L + B_M} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

ここに， α ：PSMの開水路流れを下水道管渠(管水路)の非定常流れと一致させる(同等・等価なものとする)ためのこの段階では未定のパラメータ。

PSMの流れが下水道管渠(管水路)の非定常流れを正確に反映するものとなっているためには，PSMの流れの基礎式(5)，(6)が，下水道管渠非定常流の基礎式(1)，(2)，(3)，(4)と完全に一致していることが必要である。

1) 連続の式が一致していることより：

$$\text{式(6)の} \frac{A}{B_S + B_L + B_M} \quad \text{と，式(3)の} \frac{A}{B_0 + B_r + B_L + B_M} \quad \text{が一致していることより，次式を得る。}$$

$$B_S = B_0 + B_r \quad (7)$$

2) 運動方程式が一致していることより：

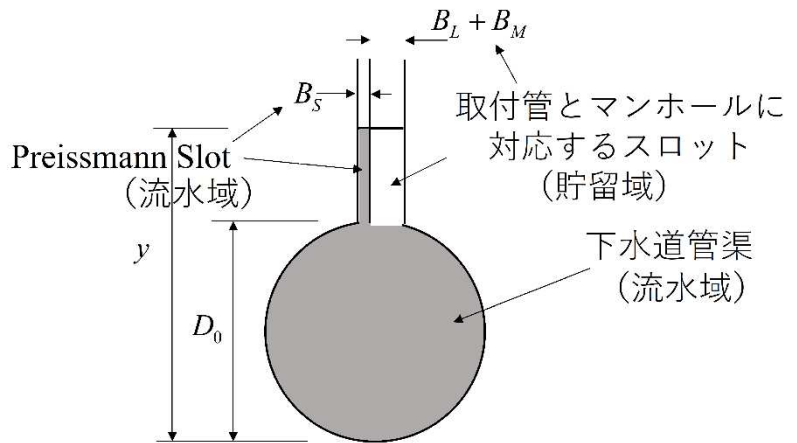


図-5 下水道管渠のスロットは，流水域としてのプライスマン・スロットと，貯留域としての（取付管とマンホールに対応する）スロットから成る。

式(5)の $R = \frac{A_0 + B_s(y - D_0)}{S_0 + \alpha(y - D_0)}$ と、式(1)の $R = \frac{A_0 + B_r(y - D_0)}{S_0 + 2 \cdot \frac{B_r}{D_0}(y - D_0)}$ が一致することより、次式を得る。

$$S = S_0 + \frac{2}{D_0} (B_r + 2B_0)(y - D_0) \quad ; \quad \alpha = \frac{2}{D_0} (B_r + 2B_0) \quad (8)$$

以上より、プライスマン・スロット（流水域）幅を式(7)，スロット部（流水域）の潤辺長を式(8)右辺第2項のように定めれば、PSMの流れは、下水道管渠（管水路）非定常流の流れに、完全に一致するものとなること分かる。

ここで、提案した（取付管とマンホールの貯留調圧作用を組み入れた）PSMにおいて、圧力波伝播速度 a （(4)式），スロット幅 B （ $= B_0 + B_r + B_L + B_M$ ，(2)式）が、実流域において、どの程度の値を取るかを見ると、説明の詳細は省略するが、圧力波伝播速度は $a = 10 \sim 20$ m/s 程度まで小さく、スロット幅は $B/D_0 = 0.05 \sim 0.20$ 程度まで、解析精度を全く低下させることなく、大きくすることが可能である。

4. 取付管とマンホールを組み入れた PSM の NILIM, 海外モデル(MOUSE, InfoWorks, SWMM, etc.) への応用

上述の取付管とマンホールの貯留調圧作用を組み入れた PSM の適用性と有用性を、図-6 に示す下水道管渠システムを用いて、数値流出実験を行って検討した。流出シミュレーション結果の1例を、図-7、-8 に示す。

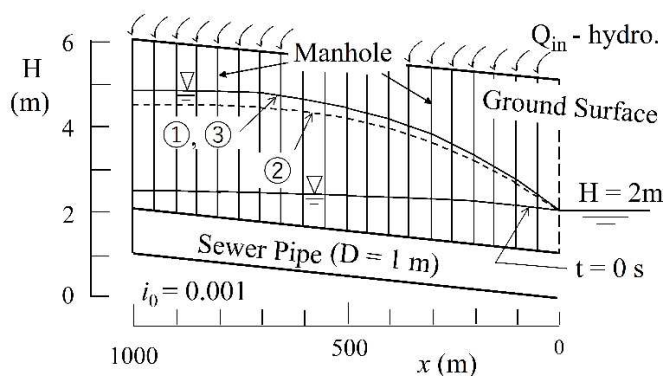


図-6 流出実験に用いた下水道管渠システム

1) 下水道管渠システムの概要：管渠全長：1,000m, 1 管渠長：50m, 管渠径：1m, こう配：1/1000, 粗度係数：0.015, マンホール本数：20 本, マンホール径：3m, 土被り：4m.

2) 流出シミュレーション条件：流入 hydro・ Q_{in} ：図-8 に示すような, peak 流量 $1.9\text{m}^3/\text{s}$, 周期 3600 秒の sine 型のもので、この 1/20 を 20ヶ所の各マンホールに流入させる, 下流端条件：水位 2m で一定, 初期条件：図-6 に示す $t = 0$ s の不等流.

3) 流出シミュレーション結果と考察：図-7, -8 中の①～③で示す結果は、以下のようである。

①：本来（従来）の PSM： $B = B_0 + B_r = 0.000007$ m, $a = 1050$ m/s, $\Delta t = 0.005$ s, $D_M = 3$ m

②：MOUSE 等： $B = 0.127$ m, $a = 7.8$ m/s, $\Delta t = 5$ s, $D_M = 3$ m（ 0.000007 m から、単に、slot を拡幅。）

③：提案の PSM： $B = 0.127$ m, $a = 7.8$ m/s, $\Delta t = 5$ s, $D_M = 1$ m（slot を拡幅し、マンホール面積の 90% を移設。）

以上より、MOUSE 等の PSM による流出シミュレーションにおいて見られた、スロット幅を単に(人為的に)

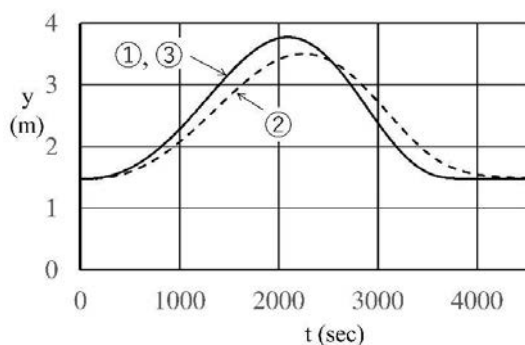


図-7 上流端水深 hydro.の比較（ピーク時の水面形を図-6 に示す）。

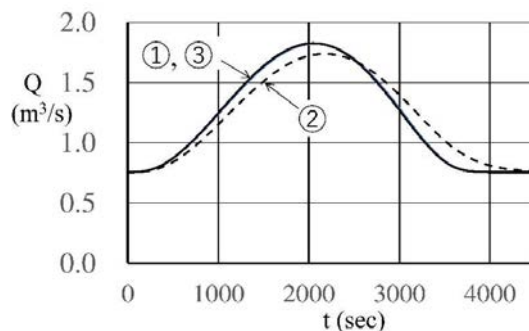


図-8 下流端流量 hydro.の比較

拡大すると流出ハイドロが低下してくる問題は、提案する PSM によれば、完全に解決されてくることが分る。

参考文献：1) 渡辺政広：都市下水道管渠網の空気圧縮・マンホール蓋飛散を伴う豪雨水流シミュレーションモデル，第 16 回都市水害に関するシンポジウム講演論文集，pp. 01-1～01-9，2017。