

水工学シリーズ 05-A-7

都市下水道流域の浸水氾濫シミュレーション

愛媛大学工学部 環境建設工学科 教授

渡邊 政広

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2005 年 8 月

都市下水道流域の浸水氾濫シミュレーション

Urban storm sewer runoff simulation with surface flooding

渡 辺 政 広

Masahiro WATANABE

1. はじめに

平成 10 年 9 月、高知市はピーク平均降雨強度（3 時間）が 94.5 mm/hr にも達する集中豪雨に襲われ、市街地中心部では 1 000 戸を越える床上浸水が発生するとともに、下水管渠網の 11 カ所でマンホール蓋が飛散し、この内の 2 カ所でマンホールへの転落事故が起こり 2 名の方が亡くなった。翌年の平成 11 年 6 月、福岡市は 1 時間強度が 77 mm、12 時間雨量が 148 mm にも達する梅雨末期の豪雨に襲われ、博多駅周辺では付近の二級河川・御笠川からの氾濫水も加わって 50 cm にも及ぶ浸水が 1 時間以上継続し、地下鉄が運休するなど都市機能が麻痺するとともに、駅周辺のビルで地下の飲食店にいた従業員が流れ込んできた氾濫水により水死した。さらに翌年の平成 12 年 9 月、名古屋市は時間最大雨量が 93 mm、総雨量が 567 mm の秋雨前線豪雨に襲われ、市内およびその周辺を流れる河川の氾濫とそれに続く広範囲での浸水が発生するとともに、停電、通信不調、鉄道不通、道路交通規制、地下鉄の浸水・水没、排水ポンプ施設の水没とそれに続く排水区での浸水など、広範な被害が発生して、名古屋市とその周辺地域などの都市機能が麻痺状態に陥った。

近年発生したこれらの水害は、都市型豪雨水害対策の緊急性と重要性をクローズアップさせ、その後組織された「都市型水害緊急検討委員会」は、「都市地域においては、水害対策を河川、下水道等の整備、管理のみに頼るのは限界があり、水害に対する危機管理対策を充実し、被害を最小限に食い止める必要がある」と述べ、地下空間の水災対策、水災予測シミュレーションとこれに基づく地域防災計画、側溝・マンホール等の転落防止などの重要性を指摘している。

本稿では、都市下水道流域における水災対策に必要とされている浸水氾濫シミュレーション・モデルで、近年、提案されている幾つかのモデルを取り上げ、それらの概要と特徴を紹介する。

2. 下水管渠網における流出シミュレーション^{1), 2)}

2.1 開水路流れの基礎式

下水管渠網における開水路流れは、下水管渠における運動方程式(1)、連続の式(2)、(3)、およびマンホールにおける連続の式(4)により、次のように表される。

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} + V \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2),$$

$$c = \sqrt{\frac{gA}{B}} \quad (3)$$

$$\sum Q_{in} - \sum Q_{out} = 0 \quad (4)$$

ここに、 V ：断面平均流速、 h ：水深、 c ：微小擾乱の伝播速度、 A ：流水断面積、 B ：水面幅、 R ：径深、 S_0 ：下水管渠のこう配、 n ：下水管渠のマニングの粗度係数、 $\sum Q_{in}$ ：流入流量の合計、 $\sum Q_{out}$ ：流出流量の合計、 g ：重力加速度、 x ：距離、 t ：時間。

2.2 圧力流れ（満管流れ）の基礎式

(1) 流れの基礎式（ラテラル・モデル）

下水管渠には、図-1 に示すように、家庭からの汚水と道路面からの雨水を下水管渠へ排水するための取付管（直径 15 cm）が多数、接続されている。強雨時あるいは豪雨時に下水管渠網で発生する圧力流れ（満管流れ）は、上述した取付管における流出雨水の貯留を考慮し、水は非圧縮性、管壁は剛であるとする、下水管渠における運動方程式(5)、連続の式(6)、(7)、およびマンホールにおける連続の式(8)により、次のように表される。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + \frac{n^2 |V| V}{R^{4/3}} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{c'^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$; \quad c' = \sqrt{g \frac{L}{N} (\sin \theta) \frac{A_p}{A_\ell}} \quad (7)$$

$$\frac{dh_M}{dt} = \sum Q_{in} - \sum Q_{out} \quad (8)$$

ここに、 h ：下水管渠底から測った圧力水頭、 c' ：圧力波伝播速度、 L ：下水管渠の長さ（上下流マンホール間の距離）、 A_p ：下水管渠の断面積、 A_ℓ ：取付管の断面積、 N ：取付管の本数（ L 間）、 θ ：取付管の接続角度（水平面とのなす角）、 h_M ：マンホールでの水深。

また、入口および出口損失³⁾は、下水管渠の摩擦損失の中に含めて取り扱えるものとしている。

(2) 圧力波伝播速度

上式(5)～(8)は、下水管渠網の圧力流れをできる限り厳密に記述した基礎式であり、連続の式(6)、(7)より、圧力波伝播速度 c' は、実際には、取付管と下水管渠の諸量から算定され、また、図-2 から明らかなように、これまで採用されてきた 1 000～1 400 m/s ではなく、実は、12～120 m/s（下水管渠径 $D = 0.25 \sim 2.0$ m）程度となっていることが分かる。

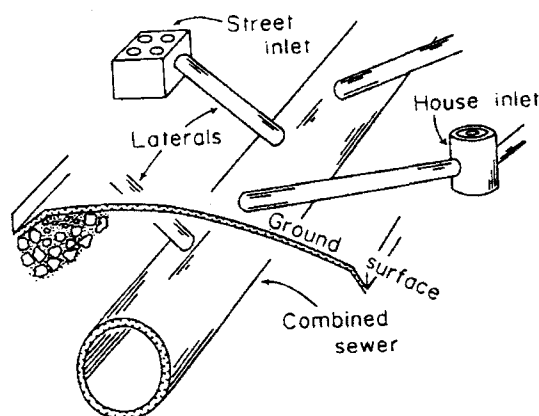


図-1 下水管渠と取付管

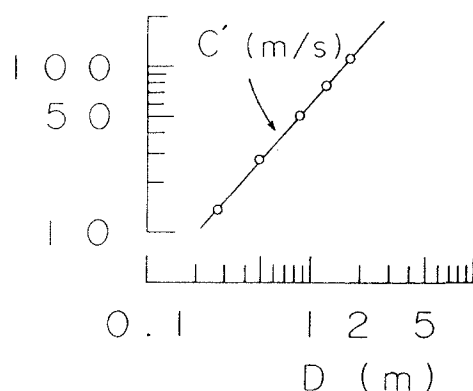


図-2 圧力波伝播速度

(3) スロット・モデル

上述した下水管渠における圧力流れの基礎式（ラテラル・モデル）(5)～(7)は、先述した開水路流れの基礎式(1)～(3)と異なっているが、このことは、下水管渠網の流れの数値解析において、本来的に、計算上の不安定が引き起こされ易いことを意味している。

そこで、図-3 に示すように、下水管渠の頂部に微小幅のスロット（プライスマン・スロット）を想定すると、実際の圧力流れは見かけ上の開水路流れに変換され、開水路流れの基礎式(1)～(3)のみで下水管渠の開水路流れと圧力流れの両流れを記述できることになる。

すなわち、次式

$$\begin{cases} R = (\text{満管流れの径深}) = \text{一定} \\ c = (\text{圧力波伝播速度}) = \text{一定} \end{cases} \quad (9)$$

； （ $h \geq D$ のとき）

が成立するとすれば、下水管渠の流れは、常に、開水路流れであるとして取り扱えることになる。

(4) スロット幅とラテラル・モデル

ここで問題となるのが、スロット幅 B_s をどのように設定すればよいかである。

これまでの議論から明らかなように、圧力波伝播速度 c には、厳密なラテラル・モデルにおける c' を採用すればよい。

すなわち、次式が成立するようにスロット幅を決定すれば、実用上のスロット・モデルは厳密なラテラル・モデルに等価であることになる。

$$c = \sqrt{\frac{gA_p}{B_s}} = c' \quad \text{or} \quad B_s = \frac{gA_p}{c'^2} \quad (10)$$

上式および図-2 より、下水管渠のスロット幅 B_s は、3.3～2.1 mm ($D = 0.25 \sim 2.0$ m) 程度となることが分かる。

2.3 遷移流れ

開水路流れと圧力流れの間の遷移流れは、厳密には、不連続部を伴っているが、ここでは、実用上の立場から、そうした不連続部は存在しないこととして取り扱う。

すなわち、下水管渠網の流れは、常に、開水路流れであるとして、上述した開水路流れの基礎式(1)～(4)および式(7)～(10)を適用して解析する。

2.4 数値計算法

下水管渠網の流れの基礎式の数値計算法として、ここでは、特性曲線法を採用する。

特性曲線式およびその上で成立する特性方程式は、それぞれ、次式のようなものである。

$$\frac{dx}{dt} = V \pm c \quad (11)$$

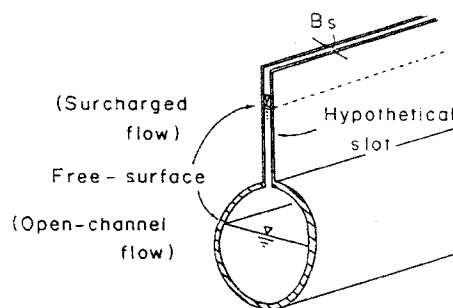


図-3 下水管渠と仮想スロット

$$\frac{dV}{dt} \pm \frac{g}{c} \frac{dh}{dt} - g \left(S_0 - \frac{n^2 |V| V}{R^{4/3}} \right) = 0 \quad (12)$$

計算区間 Δx の全域で流れが開水路流れあるいは圧力流れ（見かけ上は開水路流れ）である場合には、特性曲線および特性方程式に対して通常の1次あるいは2次の差分スキームを適用して数値計算を遂行することにより、一般には、計算上の不安定などが生ずることはない。

しかしながら、 Δx の区間内で遷移流（開水路流れ $\leftrightarrow$ 圧力流れ）が出現している場合には、開水路流れと圧力流れとで、先述したように、微小擾乱の伝播速度が1～2 オーダも異なるため、上述した通常の差分スキームを適用すると、ほぼ確実に、計算不能の状況が生ずる。

これは、遷移流が出現している $\Delta x \cdot \Delta t$ の領域において、特性曲線が直線あるいはなめらかな曲線になっていないこと、および特性曲線上で成立する特性方程式の差分化に際して線形変化の仮定が全く通用しないことによるものである。

そこで、図-4 に示すように、遷移流の出現している $\Delta x \cdot \Delta t$ の領域に限って計算時間間隔 Δt を M 等分し、特性曲線と特性方程式を逐次積分する方式を考えた。

たとえば、正の特性曲線とその上で成立する特性方程式に関する逐次積分は、それぞれ、次式のように表される（図-4）。

$$x_p - x_r = \sum_{i=1}^M \left[\frac{1}{2} \{ (V+c)_{i-1} + (V+c)_i \} \cdot \left(\frac{\Delta t}{M} \right) \right] \quad (13)$$

$$V_p - V_r + g \sum_{i=1}^M \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{c_{i-1}} + \frac{1}{c_i} \right) \cdot (h_{i-1} - h_i) \right] - g S_0 \Delta t + g \sum_{i=1}^M \left[\frac{1}{2} (S_{f,i-1} + S_{f,i}) \cdot \left(\frac{\Delta t}{M} \right) \right] = 0$$

$$; \quad S_f = \frac{n^2 |V| V}{R^{4/3}} \quad (14)$$

この逐次積分方式を用いれば、遷移流に対して安定した数値解の得られることが確かめられている。

なお、分割数について理論的な検討を進めた結果、実用上からは、 $M=30$ とすればよい結果を得ている。

2.5 マンホールの水理学的役割（圧力流れ）⁴⁾

(1) マンホールと取付管

これまで、圧力流れ時のマンホールの水理学的役割、すなわち、マンホールにおける流出雨水の貯留が圧力流れの流出特性にどのような影響を及ぼすかについての理論的検討は全くなされてこなかった。

そのため、下水管渠網におけるサーチャージを伴う流出解析において、解析を経済的かつ簡易化する

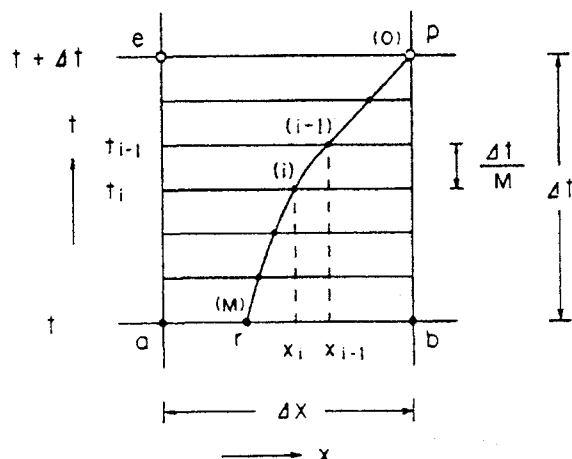


図-4 逐次積分法（特性曲線法）

ため、マンホールは、しばしば、解析上不要な付帯構造物であるとして、それらの多くが無視あるいは間引かれてきた。

しかし、2.2 で述べたように、直径が 15 cm 程度の取付管が僅かな本数、存在しているだけで、それら取付管における流出雨水の貯留効果によって下水管渠の圧力波伝播が著しく低下してくる事実を見ると、直径が取付管の数 10 倍、断面積は数 100 倍にも達するマンホールが、下水管渠網における圧力流れの伝播速度を、取付管のそれ以上にさらに低下させるであろうことは明らかである。

(2) マンホールの水理学的役割

マンホールが数 100 本の仮想の取付管の集合体であると考え、図-5 に示すように、これら取付管を全て下流の下水管渠に付け替える。

こうした付け替えを行った下水管渠網における圧力流れの基礎式(下水管渠の運動方程式、連続の式、マンホールでの連続式)は、次のように表される。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + \frac{n^2 |V| V}{R^{4/3}} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{c''^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (16)$$

$$; \quad c'' = \sqrt{g \frac{LA_p}{F_M + N(A_\ell / \sin \theta)}} = \frac{c' \cdot c'_M}{\sqrt{c'^2 + c_M'^2}} \quad (17)$$

$$; \quad c'_M = \sqrt{g \frac{LA_p}{F_M}} \quad (18)$$

ここに、 c'' : 実在する取付管と付け替えられた仮想の取付管が存在する下水管渠における圧力波伝播速度、 c'_M : 付け替えられた仮想の取付管のみが存在する下水管渠における圧力波伝播速度、 F_M : マンホールの水面積。

上述した 3 種の圧力波伝播速度の無次元量は、代表流速として $\sqrt{gD}$ (D : 下水管渠の直径) を用いると、次のように表される。

$$\begin{cases} c_*'' = c'' / \sqrt{gD} \\ c_*' = c' / \sqrt{gD} \\ c_{M*}' = c'_M / \sqrt{gD} \end{cases} \quad (19)$$

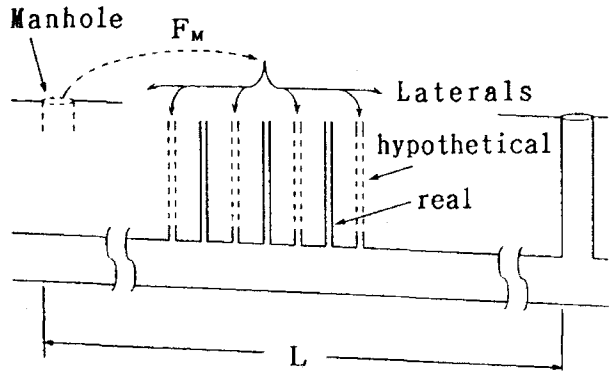


図-5 仮想取付管の付け替え

上の圧力波伝播速度の無次元量を松山市の下水管渠システムで調査した結果(図-6)を見ると、次式の成立することが分かる。

$$c_*'' \doteq c_{M*}' \quad \text{or} \quad c_*'' \doteq c_M' \quad (20)$$

上式は、下水管渠網の圧力流れの伝播速度が、マンホールの水面積によって規定されてくることを表している。

すなわち、マンホールの水面積は、圧力流れの流出特性を決定づける重要な流出パラメータであることを表している。

以上より、サーチャージを伴う雨水流出解析において、マンホールを単に無視するあるいは間引くことは、解析結果に致命的な誤差を招く可能性が高くなるであろうことが分かる。

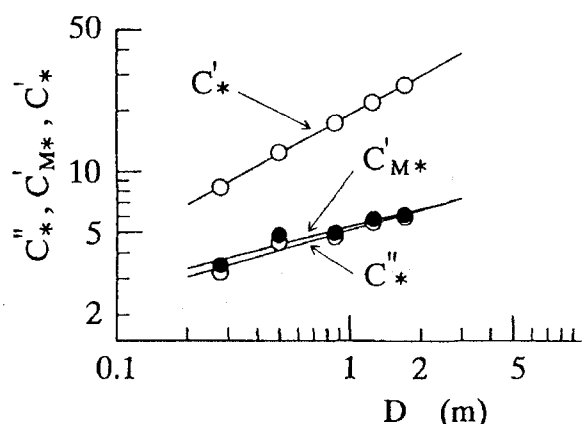


図-6 圧力波伝播速度（無次元量）の調査結果

2.6 下水管渠網のランピング手法⁴⁾

上述のように、マンホール（水面積）は圧力流れの流出特性を規定する重要な流出パラメータであり、したがって、サーチャージを伴う流出解析の精度を保つためには、マンホールは、基本的には、間引かれるべきではないということになる。

しかしながら、下水管渠網の枝線管渠まで考慮した流出解析を実施する場合などには、計算量は相当に膨大なものとなり、計算機が発達した今日であっても、やはり、下水管渠網の簡易化を図りたいことになる（ここに言う簡易化とは、幾つかのマンホールを間引くことにより、下水管渠長 L を長くし、それによって Δx と Δt を大きく採って、計算量を相当程度、減少させようとするものである）。

紙数が限られているため、検討の過程は省略するが、以下のランピング法に従えば、解析精度をほとんど低下させることなく相当数のマンホールを間引くことが可能となる。

①圧力波伝播速度の無次元量 c'_{M*} が 5 以上の下水管渠のマンホールは、それらの全てを無視し（間引い）てもよい。

② c'_{M*} が 5 以下の場合、下水管渠のマンホールを単に無視する（間引く）ことは、解析結果に致命的な誤差を招く可能性が高い。

③この場合、図-7 に示すように、間引こうとするマンホールの水面積を、それに隣接して残されるマンホールの水面積に保存するようにすればよい。たとえば、図-7 では、間引かれる 14 個のマンホール水面積は、それらの 5 個、5 個、4 個が、それぞれ、残される 3 つのマンホールの水面積に保存されている。

④また、5～6 個のマンホール水面積を 1 個のマンホールのそれに保存する程度までのランピングであれば、実用上からは、精度低下を招くことはないと言える。

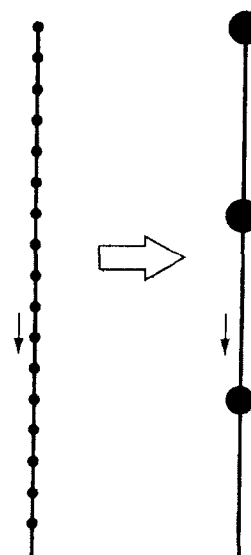


図-7 マンホールのランピング法

2.7 マンホール蓋の浮上・飛散シミュレーション⁵⁾

近年、各地の下水道流域で、豪雨時、マンホール蓋の飛散事故が多発するようになってきている。マンホール蓋の飛散事故の発生原因の一つは、豪雨時、下水管渠網での遷移流れ（図-8）の発生により、マンホール内あるいは下水管渠網内に空気塊が封入され、遷移流れの拡大と伝播に伴って空気塊が圧縮されることにより、マンホール蓋に作用する空気圧が相当程度まで高まってゆくためと考えられる。

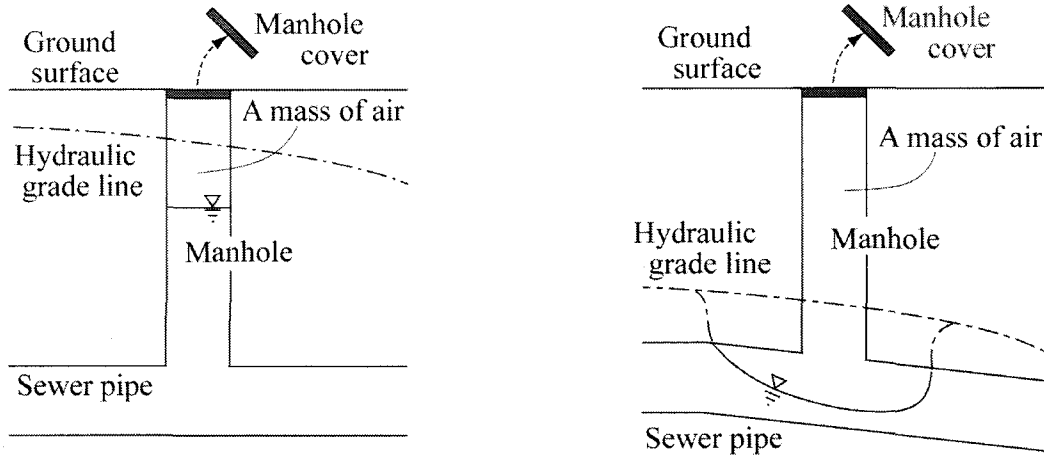


図-8 空気塊を封入する圧力流れ

(1) マンホールにおける水と空気の流れの基礎式

マンホール部分における流れの基礎式は、流入出する雨水および空気に対して質量保存則を適用すると、以下のように与えられる。

流出水の連続の式：

$$F_M \frac{dh_M}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (21)$$

空気の質量保存則：

$$\rho F_M \frac{dh_M}{dt} - F_M (h_G - h_M) \frac{d\rho}{dt} = m \quad (22)$$

$$; \begin{cases} m = C_m \cdot F_A \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}} \rho_0 \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}} \sqrt{\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1} & \text{(排気時)} \\ m = -C_m \cdot F_A \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}} \rho_0 \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}} \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} & \text{(吸気時)} \end{cases} \quad (23)$$

空気の圧縮性（空気圧と空気密度の関係式）：

$$\frac{p}{\rho^\gamma} = \frac{p_0}{\rho_0^\gamma} \quad (24)$$

全水頭の式：

$$H_M = \frac{(p - p_0)}{\rho_w g} + h_M + z_M \quad (25)$$

ここに、 ρ 、 ρ_0 、 ρ_w ：マンホール内空気密度、大気密度、水の密度、 p 、 p_0 ：マンホール内空気圧、大気圧、 F_a ：空気が流入出する空気孔および吸排気管の断面積の総和、 γ ：空気の比熱比（ $=1.4$ ）、 m ：空気孔および吸排気管を通じて流入出する空気の質量 flux、 h_M ：水深、 C_m ：縮流係数、 F_M ：水面積、 H_M ：全水頭、 h_G ：マンホール深、 z_M ：底高。また、下添字 M はマンホール地点の諸量であることを示す。

上式により、マンホール内空気圧 p が算定されると、マンホール蓋に作用する空気圧力が計算され、これと蓋の抵抗力 R_f とが比較され、蓋が浮上・飛散するか否かが決められる。

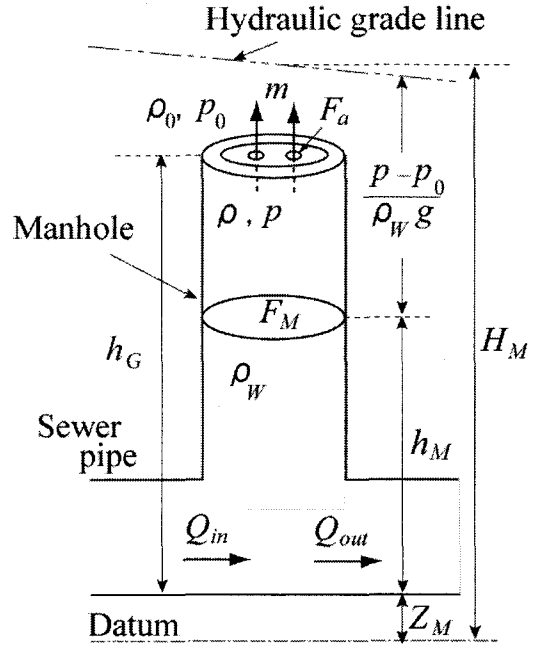


図-9 マンホール地点における質量保存則

$$\left\{ \begin{array}{l} (p - p_0)(F_C - F_a) \leq R_f \Rightarrow \text{浮上・飛散しない} \end{array} \right. \quad (26)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (p - p_0)(F_C - F_a) > R_f \Rightarrow \text{浮上・飛散する} \end{array} \right. \quad (27)$$

$$; \quad R_f = Mg + M'g \quad (28)$$

ここに、 F_C ：マンホール蓋の底面積、 F_a ：マンホール蓋の空気孔断面積の総和、 Mg ：蓋の自重、 $M'g$ ：蓋の食い込み力。

(2) マンホール蓋の浮上・飛散

マンホール蓋が浮上している場合、封入されている空気塊は、図-10 に示すように、蓋と受け枠の隙間からも流出するようになり、空気塊が流出するとともに圧縮される過程は、次式のように表される。

空気の質量保存則：

$$\rho F_M \frac{dh_M}{dt} - F_M (h_G - h_M) \frac{d\rho}{dt} = m \quad (29)$$

$$; \quad m = C_m \cdot (F_A + F_a') \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1}} \rho_0 \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}} \sqrt{\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1} \quad (30)$$

$$; \quad F_a' = \pi y \sin \alpha (D_0 + y \tan \alpha) \quad (31)$$

ここに、 F_a' ：蓋と受け枠の隙間の通気断面積（図-10）、 y ：蓋の浮上高さ、 T ：蓋あるいは受け枠の厚さ、 D_0 ：蓋底面の直径、 α ：受け枠の勾配。

また、マンホール蓋が浮上する過程は、次のように表される。

$$(p - p_0)(F_c - F_a) - Mg = M \frac{dv}{dt} \quad (32)$$

$$v = \frac{dy}{dt} \quad (33)$$

ここに, M : マンホール蓋の質量, v : 蓋の浮上速度.

(3) 下水管渠模型による流出実験

水理模型 (図-11, 管渠断面: 縦×横=10 cm×12.5 cm) による流出実験を行い, 式(21)~(25)によるマンホール内空気圧変動解析の妥当性を調べた.

実験結果と計算結果を比較した1例を, 図-12に示す. これより, 式(21)~(25)によって, マンホール内の空気圧の時間的変動を高い精度で推定しえることが分かる.

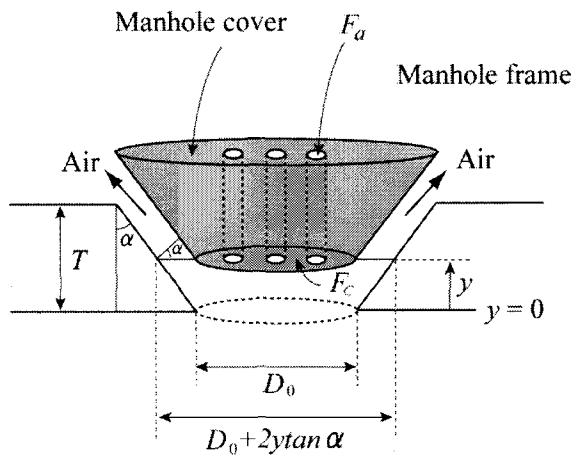


図-10 マンホール蓋の浮上

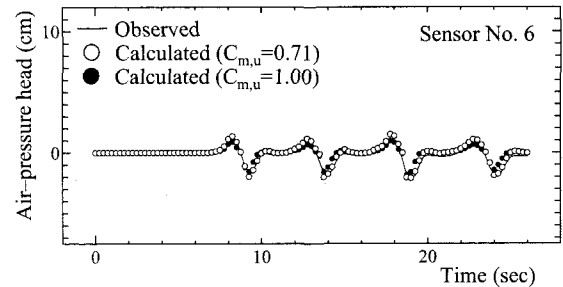
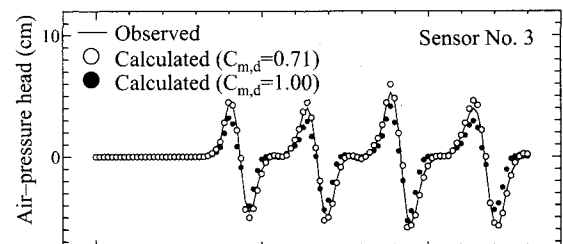
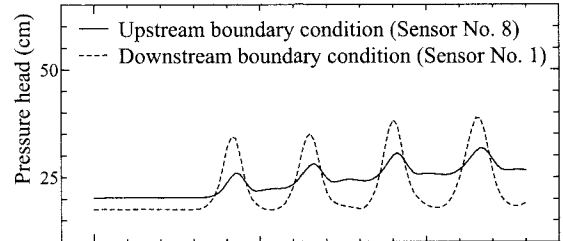
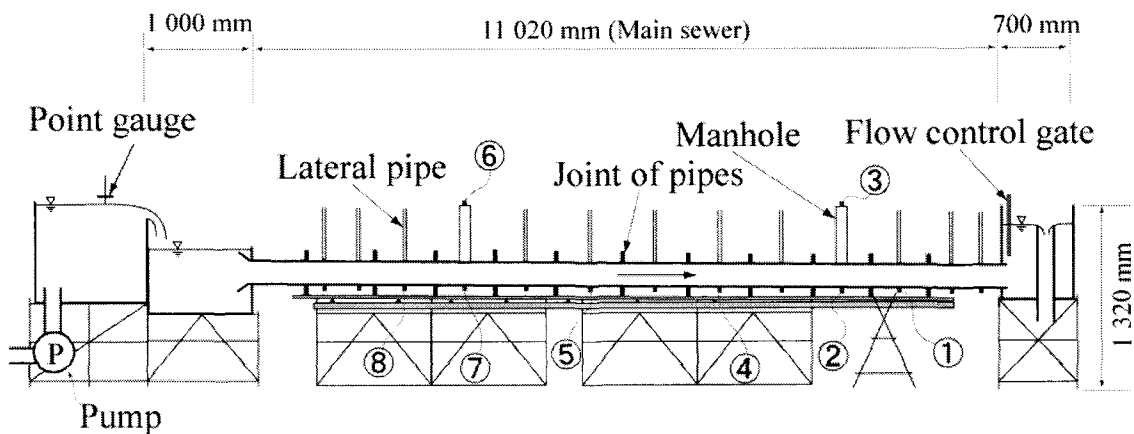


図-12 実験結果と計算結果の比較



①~⑧ : Pressure gauge number

図-11 下水管渠システムの水理模型 (○ : 圧力センサー番号)

3. 地表面における浸水氾濫シミュレーション^{6) ~ 8)}

3.1 ポンド・モデル⁹⁾

マンホールより溢水した氾濫水の地表面上での挙動はかなり複雑なものとなっているが、ここでは、地表面氾濫水は、図-13 および-14 に示すように、マンホールを囲むたん水域に水平貯留されるものとして取り扱う。ここで、たん水域面積 F_G は、当該マンホールに接合する各下水管渠上の路面（歩道および宅地内敷地を含む）面積の $1/2$ 部分を合計した面積で、次式より求める。

$$F_G = \sum_i \{(L_i / 2) \cdot W_i\} - F_G'$$

$$; \quad F_G' \begin{cases} = 0 & (i \leq 2) \\ > 0 & (i \geq 3) \end{cases} \quad (34)$$

ここに、 W : 歩道を含む路面幅、 F_G' : 右辺第1項中に含まれる合流点近傍の重複する路面面積 ($i \geq 3$ に対する) の合計。

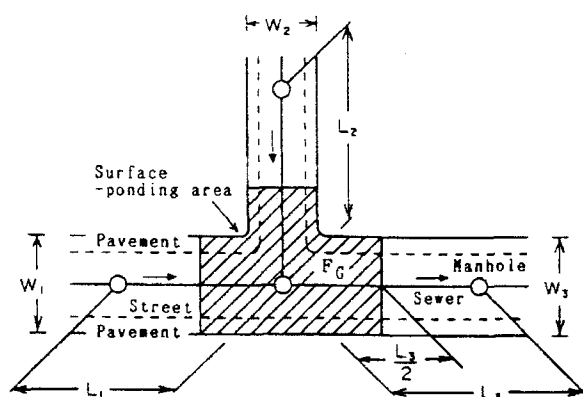


図-13 氾濫域面積の取り扱い

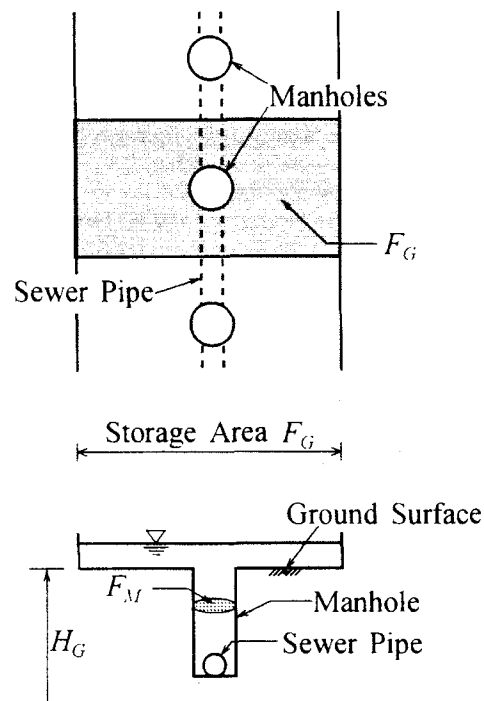


図-14 氾濫域面積

3.2 一次元流モデル^{10) ~ 12)}

上述したポンド・モデルにおいて、地表面上の水の移動を、隣接するたん水域間での水の移動（流れ）によって表現する。ここで、水の移動は、たん水域間の水位差に基づき算定される水面こう配に基づくマニング・タイプの流れによって表されると考える。

すなわち、たん水域 i からたん水域 j へ向けて流下する流量 $Q_{i,j}$ (図-15) は、次式のように表される。

$$Q_{i,j} = A_i \frac{1}{n_i} R_i^{2/3} \sqrt{\frac{\Delta H_{i,j}}{L_{i,j}}} \quad ; \quad \Delta H_{i,j} = H_i - H_j \quad (35)$$

ここに、 A_i 、 R_i 、 n_i : たん水域 i での流水断面積、径深、マニングの粗度係数、 H_i : たん水域 i の中心での水位、 H_j : たん水域 j の中心での水位、 $L_{i,j}$: たん水域 i と j の中心間距離。

また、たん水域 i での連続式は、次式のように与えられる。

$$F_i \frac{dH_i}{dt} = \sum (Q_{in})_i - \sum (Q_{out})_i \quad (36)$$

ここに, F_i : たん水域 i の水平断面積 (H_i の関数), $\sum (Q_{in})_i$, $\sum (Q_{out})_i$: たん水域 i へ流入およびたん水域 i から流出する流量の合計.

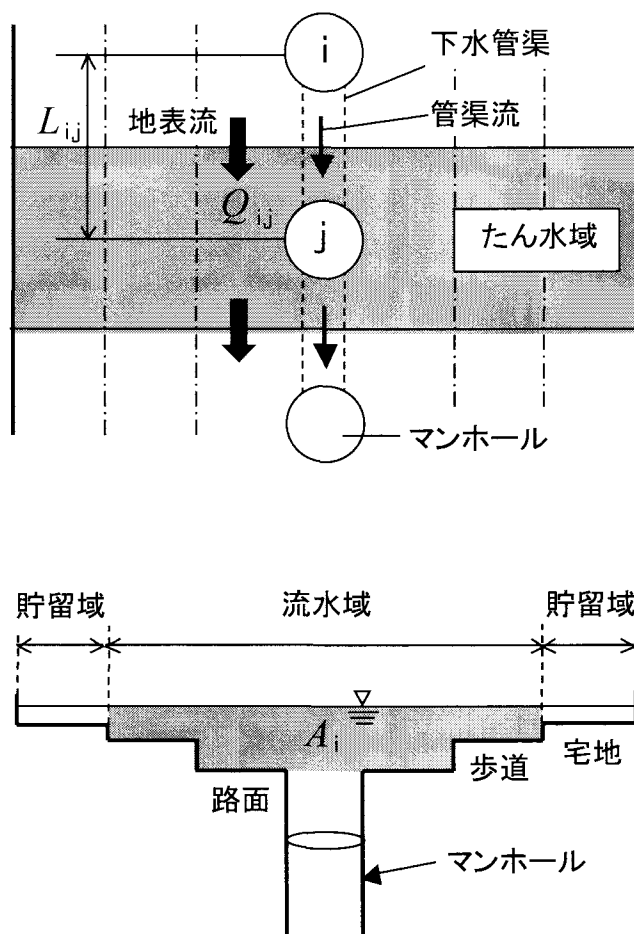


図-15 一次元流モデル

3.3 地下街の浸水氾濫モデル (井上・戸田らのモデル) ^{6) ~8)}

井上らは, 地下街を複数の領域に分割して, 各領域を固有の容積をもった貯留槽と見立て, 貯留槽間を移動する流量を求めることで, 地下街内での浸水の拡がりを表現することができるとして, 以下のような, 地下街の浸水解析法を提案している. 以下, 参考文献 6)~8) に従って, モデルの概要を説明する.

(1) 平面的な拡がりの解析

貯留槽モデルの概念図は図-16 に示すようで, 断面積 A_s のスロットを考えると, 貯留槽の連続の式は, 次式のように表される.

$$A \frac{dH}{dt} = \sum_{i=1}^m Q_i + Q_{in} \quad ; \quad A = \begin{cases} A_f : h < D \\ A_s : h \geq D \end{cases} \quad (37)$$

ここに、 A ：貯留槽の有効面積、 A_f ：貯留槽の形状を反映した面積、 h ：水深、 H ：水位、 t ：時間、 Q_i ：貯留槽が有する i 番目の接面から流入する流量、 m ：流量の出入りが行われる接面数、 Q_{in} ：地上や地下街の他の階層など外部からの流入流量、 D ：貯留槽の天井高さ。

貯留槽間の流れの運動方程式は、次式を用いる。

$$\frac{L}{gA_b} \frac{dQ}{dt} = \Delta H - \alpha L Q |Q| \quad (38)$$

ここに、 ΔH ：隣接する貯留槽間の水位差、 Q ：流量、 L ：隣接した貯水槽の図心間の距離。また、隣接した貯水槽の番号をそれぞれ i, j とし、隣接した貯水槽の平均水深および接面の幅 B_b から、接面の断面積 A_b を次式のように表す。

$$A_b = B_b \frac{\min(h_i, D_i) + \min(h_j, D_j)}{2} \quad (39)$$

また、 α は損失係数であり、マンニングの粗度係数 n を用い、次式のように表す。

$$\alpha = \frac{n^2 s_b^{4/3}}{A_b^{10/3}} \quad (40)$$

ここに、 s_b は接面の潤辺で、次式で表す。

$$s_b = B' + 2 \frac{\min(h_i, D_i) + \min(h_j, D_j)}{2} \quad (41)$$

$$; \quad B' = \begin{cases} 2B_e & (h_i \geq D_i, h_j \geq D_j) \\ B_e & (\text{上記以外の場合}) \end{cases}$$

ここに、 B_e ：流入口の有効流下幅。

(2) 上層と下層の接続

上下層の水のやり取りについては、上層と下層とをつなぐ階段部分や吹き抜けなどの穴口を流入口として、上層から下層への氾濫水の落ち込み、あるいは下層が満杯となって氾濫水が下層から上層に逆流する状態を、次のように、モデル化している。

上層から下層へ氾濫水が落ち込む場合については、図-17(1)に示すように、流入口の有効流下幅を B_e 、流入口のある上層の水深を h_e として、下層への流入流量を次の段落ち式で求める。

$$Q = B_e \mu_0 h_e \sqrt{gh_e} \quad (42)$$

ここに、 μ_0 は段落ち流れの流量係数で、 $\mu_0 = (2/3)^{(3/2)} = 0.544$ を用いる。

下層の水位が上層の床面の地盤高よりも高く、かつ上層の水位よりも低い場合については、図-17(2)に示すように、穴口を仮定の管路と見立て、上層から下層へ落ちる方向を流れの正方向と考えて、 $\Delta H = H_i - H_j$ (i, j は上層・下層を示す添字)、 A_e を穴口の断面積、 L_e を上下層間の床厚とし

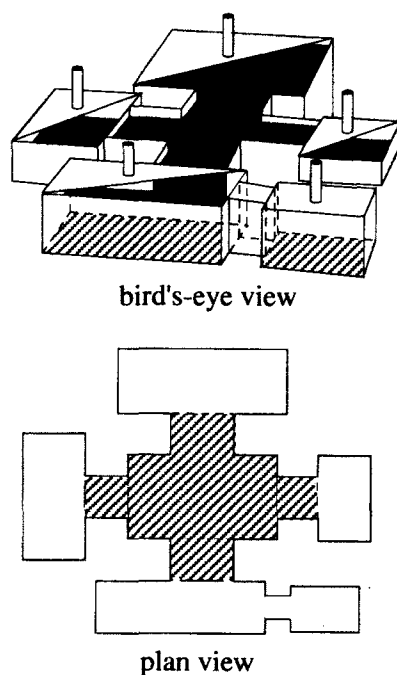


図-16 貯留槽モデルの概念図

て、式(38)と同様の次の運動方程式を用いる。

$$\frac{L_e}{gA_e} \frac{dQ}{dt} = \Delta H - \alpha_e L_e Q |Q| \quad (43)$$

ここに、 α_e は損失係数で、式(40)と同様の式で表現される。また、図-17(3)に示すように、下層の水位が上層の水位よりも高い場合についても、 $\Delta H = H_i - H_j$ (≤ 0.0) として、式(43)を用いる。ただし、上層と下層との水のやり取りは狭い穴口を通じて行われるので、急縮および急拡流れによる形状損失を考慮し、マンニングの粗度係数 n の値については式(40)の n の値よりも大きな値を用いることとする。

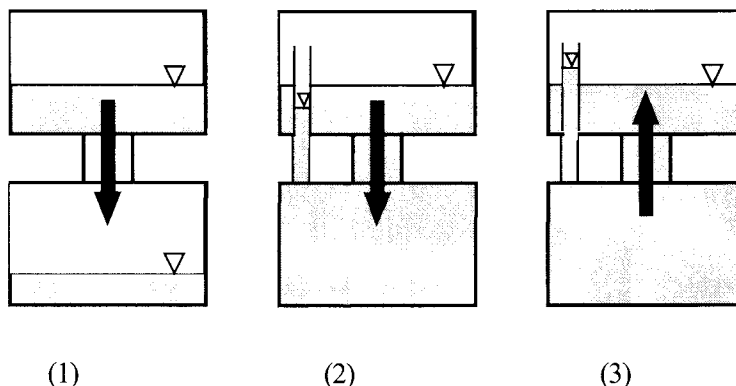


図-17 上層と下層との水のやり取り

3.4 地下鉄の浸水氾濫モデル（井上・戸田らのモデル）^{6)～8)}

井上らは、地下鉄空間へ浸入した氾濫水は、地下鉄軌道面の地盤高の低い方へと流れ落ち、窪地（下に凸）の部分から次第に溜まっていくが、窪地に溜まった氾濫水の水位が軌道面の山（上に凸）の部分よりも高くなれば、氾濫水はその山の部分を乗り越えて、より遠くへ広がっていくものと考え、次のように、地下鉄空間の浸水氾濫解析法を提案した。

まず、地下鉄空間を、図-18に示すように、両端に接続穴を有するV字型の貯留槽が一次元的に連結して構成された空間と考え、これら貯留槽間を移動する流量を求めれば、地下鉄空間における氾濫水の拡がり表現できるとしている。また、地下鉄空間の連結貯留槽モデルには、管路状態への対応を考え、スロットが組み込まれている。

図-19に示すように、貯留槽の頂部に仮想のスロットを取り付け、貯留槽の頂部よりも水深 h' が小さいときには h' をそのまま水深と考え、貯留槽の頂部よりも h' が大きいときには h' を貯留槽底面からの圧力水頭（ピエゾ水頭）と見なす。すなわち、各貯留槽における連続式を以下のように考える。

$$\frac{dV}{dt} = A(H) \frac{dh}{dt} = Q_{in} - Q_{out} + Q_{ins} \quad (44)$$

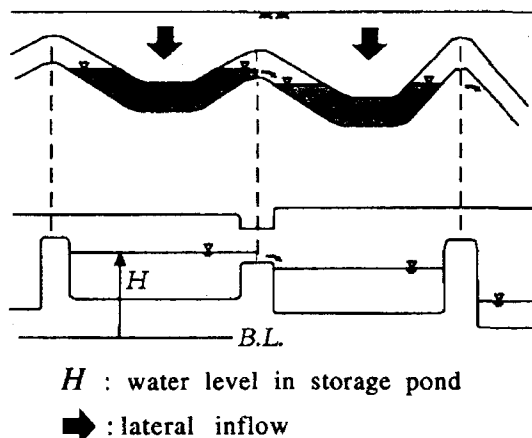


図-18 地下鉄空間の貯留槽モデル

$$A(H) = \begin{cases} \text{貯留槽形状を反映した面積} & : h' < D_c \\ A_s & : h' \geq D_c \end{cases} \quad (45)$$

ここに, V : 貯留槽内の水量, H : 水位, Q_{in} : 隣接した貯留槽からの流入流量, Q_{out} : 隣接した貯留槽への流出流量, Q_{ins} : 地上など外部からの流入流量, D_c : 貯留槽の高さ (天井高). また, A_s はスロットの底面積である.

次に, 流量式は, 隣接する貯留槽の水位と, 貯留槽間の接続部である穴口の上縁, 下縁の高さとの関係に応じて, 以下に示す場合に分類し, 越流公式とオリフィスの流量公式とを併用した解析を行う (図-20).

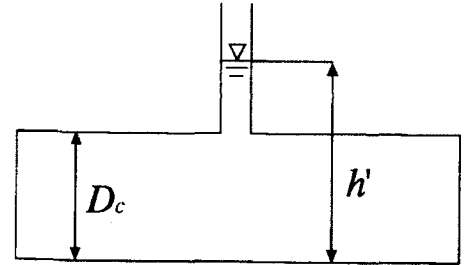


図-19 スロット・モデル

h_{up} , h_{dn} をそれぞれ, 穴口の地盤高を基準とした高さからの上流側, 下流側の貯留槽の水深, D を穴口の高さ (開口高さ), B を穴口の幅 (横幅) とすると, 流量式は以下のように表される.

1) $D \geq h_{up} \geq 0.0$ の場合

本間の越流公式を用いて,

$$Q = \begin{cases} \mu B h_{up} \sqrt{2g h_{up}} & h_{dn}/h_{up} \leq 2/3 \\ \mu' B h_{dn} \sqrt{2g(h_{up} - h_{dn})} & h_{dn}/h_{up} > 2/3 \end{cases} \quad (46)$$

ここに, μ , μ' は流速係数で, それぞれ, 0.35, 0.91 とする.

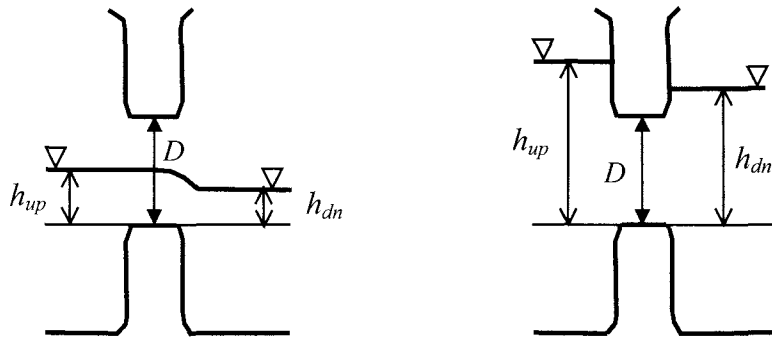


図-20 貯留槽間の流れのパターン

2) $h_{up} \geq D$ の場合:

オリフィスの流量公式を用いて,

(i) $h_{dn} \leq 0.0$ (下流水位が穴口の地盤高以下) のとき,

$$Q = \frac{2}{3} C \sqrt{2gB} \left\{ h_{up}^{\frac{3}{2}} - (h_{up} - D)^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (47)$$

(ii) $D \geq h_{dn} > 0.0$ のとき,

$$Q = \frac{2}{3} C \sqrt{2g} B \left\{ (h_{up} - h_{dn})^{\frac{3}{2}} - (h_{up} - D)^{\frac{3}{2}} \right\} + C' B h_{dn} \sqrt{2g(h_{up} - h_{dn})} \quad (48)$$

(iii) $h_{dn} > D$ のとき,

$$Q = C' B D \sqrt{2g(h_{up} - h_{dn})} \quad (49)$$

ここに、 C および C' は流量係数で、ここでは $C = 0.61$ 、 $C' = 0.55$ を用いる。

上述した地下鉄空間の浸水氾濫解析モデルを、大阪・御堂筋線に適用した1例を、図-21に示す。大阪・梅田の地下街に $60 \text{ m}^3/\text{s}$ の氾濫水が流入し続けると、1時間後には、東梅田駅(⑩)から地下鉄空間へ氾濫水が流出し始めており、流入4時間後には、浸水は守口駅(②)北部にまで達する様子がシミュレートされている。

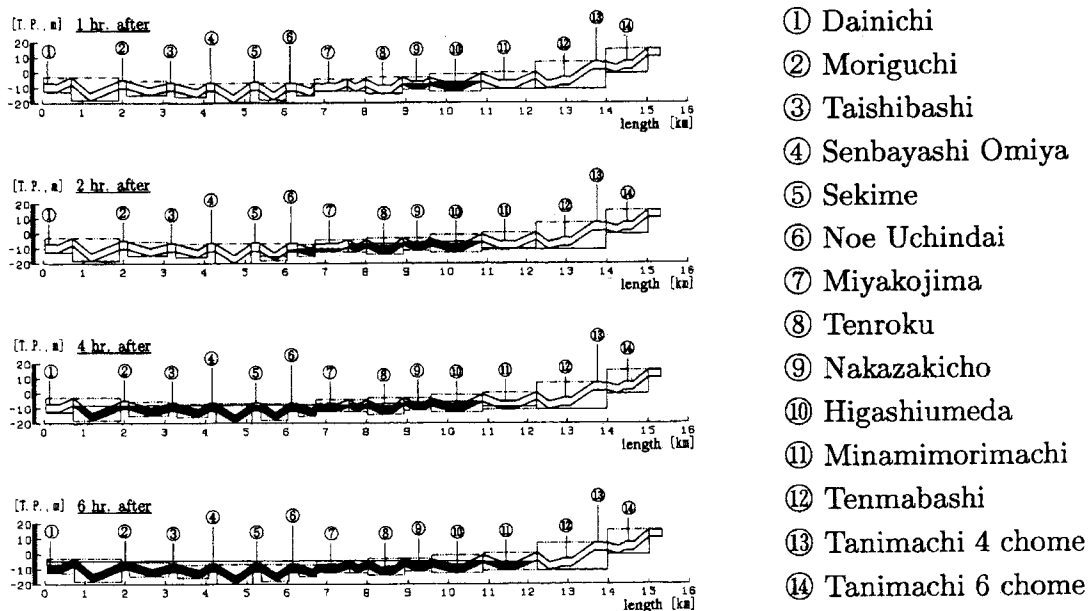


図-21 地下鉄・谷町線における浸水氾濫シミュレーション

4. おわりに

本稿では、近年、クローズアップされている都市型豪雨水害対策に必要とされる、都市下水道流域における浸水氾濫シミュレーション・モデルについて、近年、提案されてきている幾つかのモデルを取り上げ、それらの概要と特徴を紹介した。

なお、地表面における浸水氾濫シミュレーション・モデルの二次元流モデルについては、本研修会講義集の「中川 一：流木・洪水氾濫の予測技術」で詳細な解説がなされており、ここでは、参考文献13)～27)を紹介することとし、概要と特徴の紹介は割愛した。

参考文献

- 1) 渡辺政広：都市下水道管渠システムの雨水流出モデル，雨水技術資料，Vol. 31，pp. 37～42，1998.
- 2) 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網内の遷移流計算法，土木学会論文集，No. 411/II-12，pp. 81～90，1989.

- 3)荒尾慎司・三原徹治・楠田哲也：マンホール損失を考慮した雨水管路網設計の最適化に関する一研究，土木学会論文集，No. 614／II-46，pp. 109～120，1999.
- 4)渡辺政広・栗原 崇・右近雄大・恩地研輔：都市下水道管渠システムの浸水はんらん解析におけるマンホールの水理学的役割とそのランピング手法，水工学論文集，第40巻，pp. 661～668，1996.
- 5)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.
- 6)井上和也・戸田圭一・川池健司・栗山健作・大八木亮：地下空間における浸水過程の解析について，京都大学防災研究所年報，第45号B，pp. 173～184，2002.
- 7)戸田圭一・栗山健作・大八木亮・井上和也：複雑な地下空間における浸水解析，水工学論文集，第47巻，pp. 877～882，2003.
- 8)間島真嗣・戸田圭一・大八木亮・井上和也：都市域の地上・地下空間を統合した浸水解析，水工学論文集，第49巻，pp. 601～606，2005.
- 9)渡辺政広・豊國永次：都市域の流出解析（2）一流域特性のモデル化と流出解析一，自然災害科学，No. 8，Vol. 3，pp. 46～83，1989.
- 10)関根正人・河上展久：都市における内水氾濫と地下街浸水の被害予測に関わる数値解析，水工学論文集，第47巻，pp. 889～894，2003.
- 11)関根正人・河上展久：都市域における内水氾濫と地下鉄に接続する地下空間の浸水に関する数値解析，水工学論文集，第49巻，pp. 595～600，2005.
- 12)関根正人・河上展久：地下街を抱える高度に都市化された地域の内水氾濫に関する数値解析，土木学会論文集，No. 789／II-71，pp. 47～58，2005.
- 13)川池健司・井上和也・戸田圭一・坂井広正・相良亮輔：低平地河川流域における都市域の氾濫水理モデルの開発，京都大学防災研究所年報，第44号B-2，pp. 299～311，2001.
- 14)中川 一・石垣泰輔・武藤裕則・井上和也・戸田圭一・多河英雄・吉田義則・辰巳賢一・張 浩・八木博嗣：都市における洪水氾濫一大規模な洪水氾濫模型装置を用いた実験と解析一，京都大学防災研究所年報，第46号B，pp. 575～590，2003.
- 15)Nguyen Tat THANG, Kazuya INOUE, Keiichi TODA, and Kenji KAWAIKE : A model for flood inundation analysis in urban area: verification and application，京都大学防災研究所年報，第46号B，pp. 303～315，2004.
- 16)武田 誠・松尾直規：都市域における総合的氾濫解析法に関する検討，京都大学防災研究所年報，第47号B，pp. 283～292，2004.
- 17)戸田圭一・井上和也・村瀬賢・市川温・横尾英男：豪雨による都市域の洪水氾濫解析，土木学会論文集，No. 663／II-53，pp. 1～10，2000.
- 18)川池健司・井上和也・林秀樹・戸田圭一：都市域の氾濫解析モデルの開発，土木学会論文集，No. 698／II-58，pp. 1～10，2002.
- 19)川池健司・井上和也・戸田圭一・野口正人：低平地河川流域での豪雨による都市氾濫解析，土木学会論文集，No. 761／II-67，pp. 57～68，2004.
- 20)川池健司・井上和也・戸田圭一：非構造格子の都市氾濫解析への適用，水工学論文集，第44巻，pp. 461～466，2000.
- 21)武田誠・松尾直規・山中威士・森田豊：総合的な氾濫解析システムの構築に関する研究，水工学論文集，第49巻，pp. 613～618，2005.
- 22)武田 誠・松尾直規・中嶋大次郎：非構造格子を用いた氾濫解析に関する一考察，水工学論文集，第47巻，pp. 895～900，2003.

- 23)井上和也・戸田圭一・前田修：河川網が発達した領域での氾濫解析法とそのメコンデルタへの適用，水工学論文集，第44巻，pp.485～490，2000.
- 24)重枝末玲・秋山壽一郎：市街地構造を考慮した氾濫解析モデルの総合的な検証，水工学論文集，第48巻，pp.577～582，2004.
- 25)重枝末玲・秋山壽一郎・浦 勝・有田由高：非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面2次元洪水流数値モデル，水工学論文集，第45巻，pp.895～900，2001.
- 26)重枝末玲・秋山壽一郎：複雑な地形起伏を有する場における氾濫流の数値シミュレーション，水工学論文集，第47巻，pp.871～876，2003.
- 27)平井真砂郎・道上正規・檜谷治：都市域における浸水氾濫解析に関する基礎的研究，水工学論文集，第40巻，pp.405～412，1996.