

地下水路系システムにおける 実用的な水理解析手法

PRACTICAL HYDRAULIC SIMULATION MODEL FOR UNDERGROUND DRAINAGE SYSTEM

平井真砂郎¹・道上正規²・檜谷 治³

Masaro HIRAI, Masanori MICHUE and Osamu HINOKIDANI

1 正会員 工修 株式会社日水コン 環境事業部 (〒163-11 新宿区西新宿 6-22-1 新宿スクエアタワー)

2 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4丁目 101)

3 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4丁目 101)

A practical numerical simulation model is presented for the underground drainage network system with a large scale drainage pumping station. In this model, the hypothetical slot at the crown of the pipe is installed to analyze the pressurized flow, and the MacCormack scheme for numerical solution technique is applied to simulate the mixed flow condition of sub-critical and super-critical flow. The model is verified by comparison with monitoring water levels of laboratory tests and existing drainage network system with pump station. From these calculation results, it is shown that the simulation model is very useful to simulate unsteady free surface-pressurized flows and surge phenomenon of the pipe network system including the steep slope pipe.

Key Words: Underground Drainage System, Mixed Free-Surface-Pressure Flow, Slot Model, MacCormack Scheme

1. はじめに

近年、東京都の地下河川や大阪のなにわ大放水路計画に代表されるように都市域の雨水排除施設の大規模化・大深度化が進んでいる。こうした雨水排除施設の大規模化・大深度化の背景には、地上部での稠密な土地利用の進展により河道拡幅といった対策は導入が困難であり、また、地下にあっては地下鉄等の地下構造物の錯綜によりより深い位置にその場を求めざるをえない状況にあることが挙げられる。

ポンプ併用型の下水道幹線施設の場合は、ポンプ場の運転方式によっては非定常性の強い現象が生じ、管路内でのサージングや場合によっては水位の急上昇・空気圧縮による管路施設の破壊・ポンプ場の水没等の被害を招くこともありうる。また、縦断形状については、既存の地下構造物の位置関係から、やむを得ず急勾配管路を導入せざるをえない状況もあり、常流・射流が混在する。また、開水路状態と閉水路状態が混在するといった複雑な流況の発生も想定される。さらに、既存管路施設からのオーバーフロー水を輸送・排除する増強管方式の場合は、増強管に取り込まれたオーバーフロー水が段波状になって下流のポンプ場に押し寄せる。この際、ポンプ施設のかけ遅れ等があるとポンプ場の水没等の危険性がある。その場合には、降雨予測・流量モニタリングを組み

合わせてポンプ運転を行うことが有効と考えられる。

本研究では、上記したような地下河川や大規模下水道雨水幹線施設を対象とした場合に、特にポンプ場での運転管理とその影響が管路内にどのように伝播していくかを精度よくシミュレートできる実用的な水理解析手法を提案する。本研究では、精度と安定性に優れ、常流・射流が混在した流れを精度よく解くことのできる予測子修正子法の1種である MacCormack 法を用いて管路内の非定常現象を解析する分析モデルを提示する。この分析モデルを用いてポンプ運転の影響分析事例としてポンプ運転に伴う管路内サージング解析の事例を示し、分析モデルの有効性・適用性を明らかにする。

2. 数値解析モデル

地下水路系の場合は、開水路流れと圧力流れの両者が混在し、なおかつ、下流端でのポンプ・ゲート操作の影響が上流側に伝播していくという非常に複雑な水理現象を示す。また、下水道管渠網の場合、管渠の接続状況は、既存の地下埋設物の影響から急勾配とならざるをえない状況となることが多く管渠内での跳水の発生もみられる。

開水路と閉水路が共存する場合の非定常流の解析モデルとしては下記の2つに分類される。1つは、Cunge-Wegner¹⁾によるスロットモデルである。図-1 にこのモデ

ルを示す。

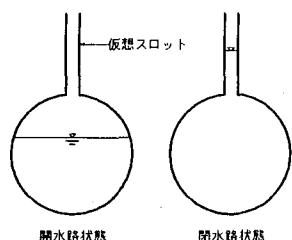


図-1 Cunge-Wagner モデル

実際にはこのようなスロットはないのであるから、このようなスロットを仮定することは誤差を導入することになるが、このスロットが管の断面積や径深に大きな影響を与えない程度に細いものであれば、実用上十分な精度での解析が可能である。このようなスロットを設けることを仮定すると、閉水路はすべて開水路に置き換わったこととなり、開水路と閉水路の区別をする必要がなくなり、すべての領域を開水路として取り扱えばよいこととなる。ただし、スロットモデルでは全領域を開水路として取り扱うために、閉水路で発生する水中分離現象や負の圧力の発生や空気だまりの発生などを取り扱うことができない。スロットの幅は(1)式に示すように圧力波伝播速度と管渠断面積から設定される。

$$B_s = gA/c^2 \quad (1)$$

ここに、 B_s : スロット幅、 A : 管断面積、 c : 圧力波伝播速度

もう1つは、開水路と閉水路の境界を判定して開水路部分と閉水路部分をそれぞれ解析していくものである。

こうした管路・開水路流れ境界面の伝播を考慮した非定常流解析法としては、Song-cardle-Leung²⁾、細田ら³⁾による研究がある。また、古川ら⁴⁾は、無水状態と射流区間に対しては2step Lax-Wendroff法、常流区間および閉水路状態には特性曲線法を用い、閉水路と開水路の境界においてはスロットを仮定して解析手法の切り替えを行うモデルを提案している。しかしながら、解析途中で解析手法を切り替える手法では分・合流を有する複雑な管路ネットワークへの適用を考えた場合、種々の特別処理を想定しておく必要があり解析システム自体が極めて複雑になる。

本研究では、分・合流を有する複雑な管路系への適用性を考慮してスロットモデルを採用し、地下水路系でのサージ現象解析への適用性について検討する。なお、計算スキームについては、常流・射流が混在した複雑な流れにも適用でき、精度ならびに安定性の面で優れるMacCormack法⁵⁾ (以下、MC法と略す) による差分モデルを適用する。

2. 基礎式および差分化

(1) 流れの基礎式

本研究では、閉水路区間については、管路上部にスロットを仮定することから、基礎式としては開水路に関するもののみとなる。一次元不定流の基礎式を保存則型で

表せば下記のとおりである。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = b \quad (2)$$

ここに、

$$U = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} Q \\ (P/\rho)_b + Q^2/A \end{pmatrix},$$

$$b = \begin{pmatrix} q \\ gA(S_z - S_f) \end{pmatrix}$$

A : 流水断面積、 Q : 流量、 P : 圧力、 ρ : 密度、 q : 横流入量、 g : 重力加速度、 S_z : 管路勾配、 S_f : 摩擦勾配 ($= n^2 Q |Q| / A^2 / R^{4/3}$)、 n : マニングの粗度係数、 R : 径深

(2) MC法による差分化

MC法は、時間 step 毎に荒い近似 (予測子段階) とその修正 (修正子段階) を繰り返す時間依存差分法の1種である。この手法は時間・空間方向に二次の精度を持ち、跳水等を含む計算や段波などの計算においても安定に解析できる。予測子段階、修正子段階の差分式は下記のように表される。

[予測子段階] :

$$U_j^P = U_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{j+1}^n - F_j^n) + \Delta t b_j^n + V_j^n \quad (3)$$

[修正子段階] :

$$U_j^{n+1} = \frac{1}{2} (U_j^n + U_j^P) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} (F_j^P - F_{j-1}^P) + \frac{1}{2} (\Delta t b_j^P + V_j^P) \quad (4)$$

ここに、 Δt : 計算時間間隔、 Δx : 距離に関する差分間隔、 n, p : それぞれ現時刻、修正子段階を表すサフィックス、 j : 距離ステップを表すサフィックス、 V : 人工粘性項

人工粘性項は、跳水を含む計算や段波などの計算を安定的に行うために導入するものであり、種々の形式が提案されているが、本研究では岡部ら⁶⁾の用いた下式を用いる。

$$\text{予測子段階: } V_j = -(D_{j+1} - D_j) \quad (5)$$

$$\text{修正子段階: } V_j = +(D_j - D_{j-1}) \quad (6)$$

ただし、

$$D_j = Ku_* h_j (U_{j+1} - 2U_j + U_{j-1}) \Delta t / \Delta x^2 \quad (7)$$

(3) スロット幅の影響に関する検討

ここでは、圧力波速度 (スロット幅) の影響を検討するため、簡単な数値実験を行った事例について示す。具体的には、図-2のような施設を想定し、静止状態から弁を急開し、定常状態にいたるまでの状況を解析する。

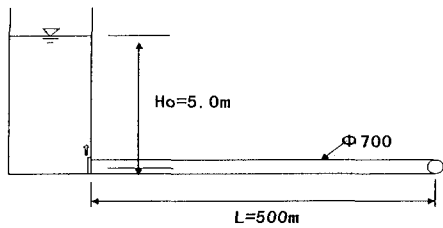


図-2 タンク流出の過渡現象解析の施設

図-3 に各解析ケースにおける下流端での流速の時間変化を解析解と比較して示す。なお、各ケースとも $\Delta x = 50m, \Delta t = 0.01sec$ として解析している。これによると、圧力波速度が大きくなるほど解析解との適合性は良好になることがわかる。圧力波速度が小さい場合は、流出波形は大きく動揺しながら定常状態に移行していく状況にある。圧力波速度を小さく設定すると、計算時間間隔を大きくとることができるが、実現と異なる結果を与えることになり、適切なスロット幅を設定しなければならないことが理解される。参考のため、図-4 に解析解と数値解の累積二乗誤差の変化を示している。なお、何れのケースにおいても計算は安定に行われており、段波等の非定常な現象に対してのMC法の適用性は高いと判断できる。

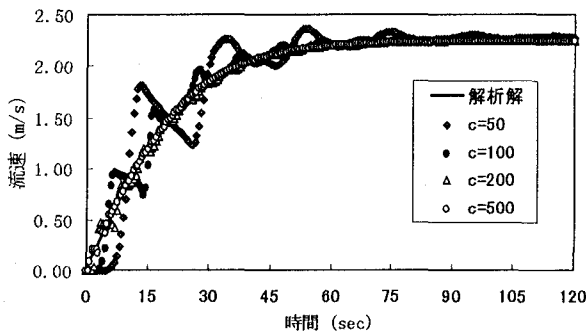


図-3 タンク流出に対する数値実験結果

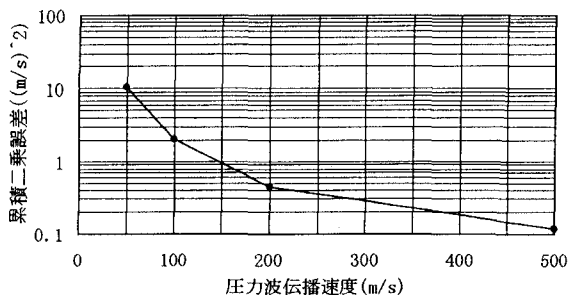


図-4 数値解と解析解の累積二乗誤差

(4) 境界での計算方法

上記の(2)で示したMC法は、管渠内の各地点での水位・流量を解析するものであり、管路施設の上・下流端条件のもとで解かれることになる。ポンプ併用型圧力管方式の場合は、下流端でのポンプ施設および制水ゲート等の挙動を適切に組み込むことが精度のよい解析を行

う場合に不可欠である。また、地下河川および大規模下水道幹線の場合には、雨水の取り込みのための立坑が設置されるのが普通であり、この立坑部分は解析上、内部境界点となる。以下では、下流端条件、特にポンプ施設が設置される場合の条件設定方法と立坑部分での解析手法について述べる。

①ポンプ場が設置される下流端部分での解析手法

ポンプ併用型下水道幹線の場合、一般的には、図-5のような構造となっており、制水ゲート室、沈砂池、ポンプ井から構成される。

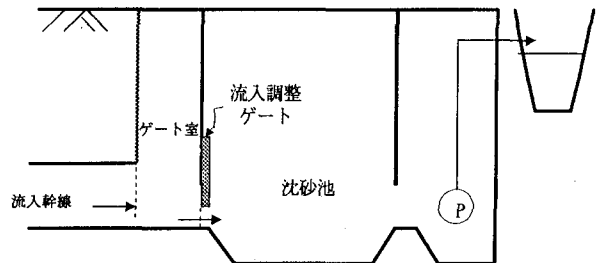


図-5 ポンプ場の一般的な構造

すなわち、通常の運転（計画排水量の範囲内）では、計画排水量で沈砂池水位が HWL となるようにポンプ起動水位が設定され、基本的には沈砂池水位は危険水位以下に保たれる。しかし、計画排水量を越える過大流入があった場合には、沈砂池機械室の水没およびキャビテーションの発生を防ぐため、ポンプ場流入量（ゲート通過流量）が排水能力以下となるようにゲート開度を調整することになる。

このゲート調整は、以下に示すように幹線内水理挙動やポンプ運転操作に様々な影響を与える。

ア) ゲート通過流量は幹線内水位、沈砂池水位、ゲート開度などの複数の要因に既定され、適切に流量制御することは困難な場合が多い。

イ) 急流入時等にゲート閉鎖操作が遅れると、沈砂池機械室の水没やキャビテーションが発生する可能性がある。

ウ) ゲート調整を行うことによりゲート通過流量を変化させれば、幹線内水位の変動（サージング）が発生する。特に、幹線が圧力状態である超過流入時のゲート調整は立坑水位等の急激な変動につながり、立坑等の人工蓋浮上原因となる。

エ) 精度的な問題から過度のゲート閉鎖（ゲートの閉めすぎ）発生は避けられないため、ポンプ場流入量が排水能力以下に抑制され、施設の有する浸水対策能力が低下する。

オ) 沈砂池水位上昇に対して、ポンプは吐出量増、ゲートは流入量減という命令を下す。沈砂池流入量に対してポンプ吐出量が過剰な場合には、急激な沈砂池水位低下が発生し、ポンプが複数台あるいは全台停止する危険性がある。

実際問題としては、上記のような問題が発生しないよ

うにゲート操作ルールやポンプ運転ルールを設定する必要があり、その最適ルールを探索するためにもこれらの要因を評価できる下流端条件の設定が必要である。

図-6 に示す記号図のもとで、下流端条件は下記の連立方程式を解くことになる。この連立方程式によって求められたゲート室水位およびゲート通過流量を管路部解析の下流端条件とする。

$$\text{【ゲート室連続式】} \quad \frac{dS_1}{dt} = Q_p - q_g \quad (8)$$

$$\text{【ゲート室水位】} \quad h_1 = f_{h1}(S_1) \quad (9)$$

$$\text{【ゲート通過流量】} \quad q_g = f_{qg}(h, h_1, h_2, B) \quad (10)$$

$$\text{【沈砂池連続式】} \quad \frac{dS_2}{dt} = q_g - q_{out} \quad (11)$$

$$\text{【沈砂池水位】} \quad h_2 = f_{h2}(S_2) \quad (12)$$

$$\text{【ポンプ吐出量】} \quad q_{out} = f_{qout}(h_2, t) \quad (13)$$

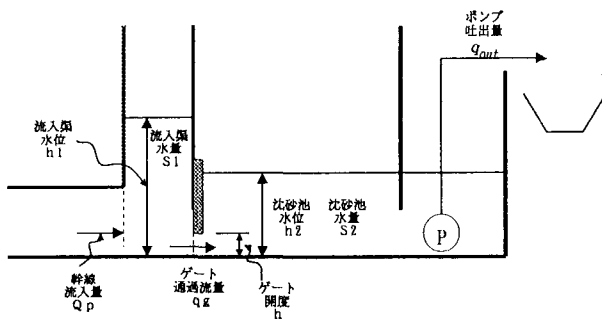


図-6 記号図

これらの式で、ゲート通過流量とポンプ吐出量が最も重要である。

あるゲート開度のもとでのゲート通過流量は、ゲート開度だけでなく流入渠水位と沈砂池水位に規定され、種々の状況が想定される。一般的には、流入渠水位と沈砂池水位の組み合わせに対して例えば下記の3つの式を使い分けることになる。

●完全流出：本間の式

$$Q = \mu_1 \cdot B \cdot h_1 \sqrt{2gh_1} \quad (14)$$

●もぐり流出：本間の式

$$Q = \mu_2 \cdot B \cdot h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (15)$$

●スルースゲート流出：スルースゲート公式

$$Q = C \cdot B \cdot h \sqrt{2gh_1} \quad C = f(h_1, h_2) \quad (16)$$

スルースゲート公式の流量係数 C は h_1 と h_2 の関係から求められる Henry の実験による値が用いられることが多いが、解析上非常に重要なパラメータであるため模型実験あるいは実施設での流量実績を基に関数関係を設定することが望ましい。

一方、ポンプ吐出量は、ポンプ特性による全揚程曲線と、内外水位差から決まる実揚程、及び吸込み、吐出管路状況で決まる抵抗曲線の交点から求まることになる。

また、雨水排水ポンプの場合の駆動方式として、ガスタービン発電や電動機が用いられる。こうした形式の場合、起動命令や停止命令を発動してから実際に計画値ま

でポンプ能力が発揮されるまでに数分程度の時間を要することになる。このポンプ運転シーケンスの影響は、段波状に流入してくる増補管方式の場合にポンプのかけ遅れ等の状況となる原因の1つであり、最近では、全速待機運転方式をとれるポンプを採用している事例もある。

いずれにしても、ポンプ排水方式を採用している施設での水理解析を行う場合においては、設置されているポンプの性能やポンプ運転シーケンス、吸入・吐出管路等の特性を十分に考慮しなければ、実際に生じている現象を十分に再現することはできず、きめ細かい運転状況を評価できるモデルの構築が重要である。

②立坑部における解析手法

大規模な地下水路系の場合は、数キロメートル間隔のオーダーで立坑が存在することが特徴である。大規模断面の地下水路系の場合は、その施工は通常、シールド工法で行われる場合が多く、発進及び到達地点に立坑が存在する。この立坑は、施工後は、管路施設の維持管理および雨水の流入立坑として機能する。水理的にはサージタンクとしての機能を有することになり、この効果を適確に表現できることが必要である。また、流入立坑として利用される場合には、流入幹線を含めたネットワーク施設として解析する必要があり、下記のようにノードにおける連続式と慣性項を無視した運動方程式を連立して解くことにより、ノードにおける水位と接する管渠の流量を求める。

ノードにおける水収支の基礎式は下記のとおりである。

$$\frac{dS}{dt} = \sum Q_{in} - \sum Q_{out} \quad (17)$$

ここに、 S : ノード貯留量 (m^3)、 Q_{in} : 流入量 (m^3/s)、

Q_{out} : 流出量 (m^3/s)

ただし、貯留量 S は水位の関数であり、地表面より上部については、例えば、勾配 1/100 の円錐型の貯留域形状をすると仮定する。

(17)式の差分化にあたっては、下記のように前進差分を適用する。

$$S^{n+1} = S^n + \{ \sum Q_{in}^n - \sum Q_{out}^n \} \Delta t \quad (18)$$

新時刻のノードにおける水位は、(18)式より得られた新時刻の貯留量とノードにおける水位一貯留量関係より求める。

管渠の上流端あるいは下流端の水位および流量は、管渠の接続状況により、落差のない場合と落差のある場合に分けて慣性項を無視した運動方程式(diffusion analog モデル)により、以下の差分式により解析する。

・落差のない場合

上流側：

$$h_i^{n+1} = h_{nd}^{n+1} - Z_i + \frac{(v_i^{n+1})^2}{2g} \quad (19)$$

$$Q_i^{n+1} = \frac{1}{m} \left(R_{i-1/2}^{n+1} \right)^{2/3} \left[\frac{(h_{i-1}^{n+1} + Z_{i-1}) - (h_i^{n+1} + Z_i)}{\Delta x} \right]^{1/2} A_{i-1/2}^{n+1}$$

下流側：

$$h_j^{n+1} = H_{nd}^{n+1} - Z_j - \xi \frac{(v_j^{n+1})^2}{2g} \quad (20)$$

$$Q_j^{n+1} = \frac{1}{m} \left(R_{j+1/2}^{n+1} \right)^{2/3} \left[\frac{(h_j^{n+1} + Z_j) - (h_{j+1}^{n+1} + Z_{j+1})}{\Delta x} \right]^{1/2} A_{j+1/2}^{n+1}$$

ここに、 m ：マンニングの粗度係数、 ξ, ξ ：損失係数・落差のある場合

$$\text{上流側（等流近似）：} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (21)$$

下流側：(20)式に同じ

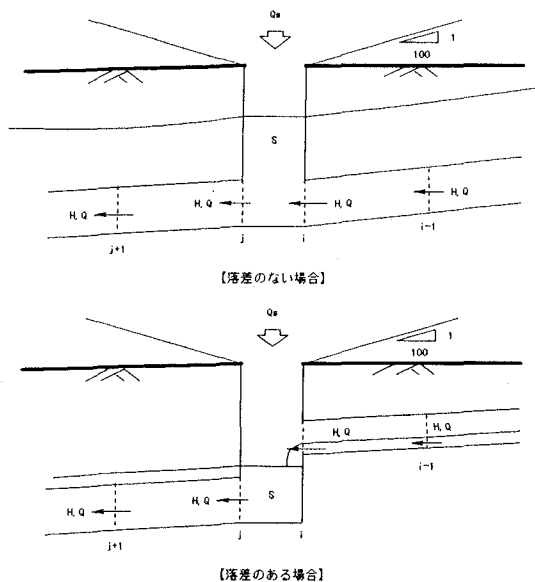


図-7 合流点処理のイメージ

3. 大規模幹線におけるサージング再現計算

ここでは、A市Bポンプ所のポンプおよびゲートの最適運転方法を検討するために実施された模型実験の結果に対して本解析モデルを適用し、サージングの再現性について考察する。

(1) 模型実験の概要

この実験は、流入幹線、沈砂池、立坑およびゲートからなる雨水排水システムにおける最適運転方法を検討することを目的としてなされたものである。対象管路は、図-8に対象施設の縦断図を示している。模型は、流下方向縮尺 1/76.3、鉛直縮尺 1/50 で作成されている。

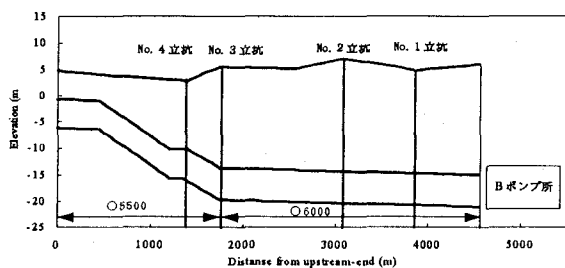


図-8 対象管路施設の概要

解析にあたって、ゲート通過流量は、ゲート開度を変

えて行われた定常状態の実験結果より、ゲート前後の水位差を用いて、次式により算定する。

$$Q = CBh\sqrt{2gh_G} \quad (22)$$

$$C = 0.0711 \ln\left(\frac{h_G - h}{h}\right) + 0.2254$$

ここに、 B ：ゲート幅、 h_G ：ゲート前水深、 h ：ゲート開度、 C ：流量係数

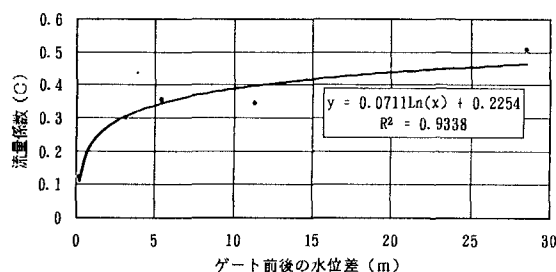


図-9 模型実験における流量係数の推定結果

(2) 再現計算結果

ここでは、模型実験の結果に対して解析モデルを適用し、その適合性について検討した1例を示す。図-10に、各立坑地点での解析水位と模型実験水位（実施設換算）の比較を示す。このケースは、上流より $50\text{m}^3/\text{s}$ の定常流入状態に対して、ゲートの緊急閉鎖の影響をみたものであり、ゲート閉鎖速度が $3.0\text{m}/\text{min}$ と最も大きいケースである。これによると、流入渠ではピーク位置および水位上昇高さが若干ずれている。この原因としては、ゲート通過流量を与える(22)式のゲート開度が小さくなったときの精度が影響しているものと考えられる。より解析精度を上げるためには、ゲートを絞りこんだ場合のゲート通過流量に関して精度良く算定する必要性が示唆された。その他の立坑では、水位上昇の開始時刻およびピーク位置もほぼ再現されており、ゲート閉鎖に伴うサージングの発生を表現できることが示された。

(3) 実績降雨での再現計算

Bポンプ所は、現在稼動しており、流入渠地点での水位が計測されている。図-11は流入渠および沈砂池における水位の時間変化状況を計算値と実績値を比較して示す。なお、ゲート開度は実績値を用いた。この結果によると、ゲートの閉塞・開放に伴う水位の急激な変化を計算値は良く再現しており、本解析モデルの実施設への適用性が高いことを示している。

図-12には、ゲート操作開始後の水面形の変化を時間をおって示している。これによると、開水路状態では跳水の影響により若干水面振動が起こっているが、開水路状態でのサージの伝播状況が明確にあらわれている。

4. おわりに

本稿では、地下河川や大規模下水道幹線施設を対象とした場合に、特にポンプ場の運転管理の影響が管路内に

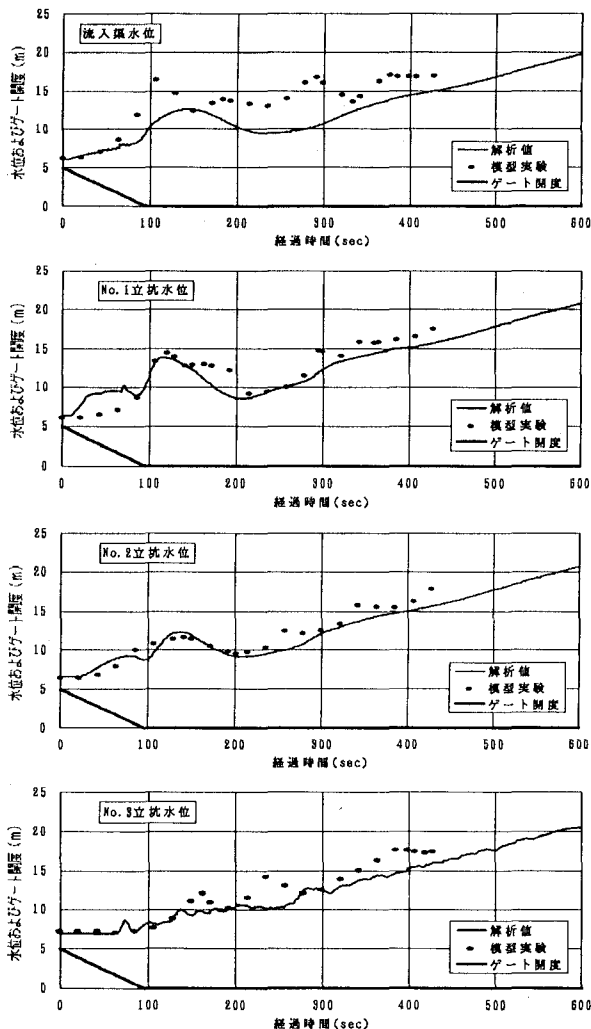


図-10 解析水位と実験水の比較

どのように伝播していくかを精度よくシミュレートできる実用的な水理解析手法として、スロットモデルとMacCormack スキームを適用したモデルを提案した。模型実験および実績降雨での検証によれば、サージ現象等の管路内で生じる現象を十分な精度で再現できることを示した。この解析手法は、開水路・閉水路とも同じ基礎式および差分モデルで解析を行うため、プログラムは簡単であり、分合流を含む複雑な管渠網への適用性も高いと考える。ただし、閉水路で発生する水中分離現象や負の圧力の発生や空気だまりの発生などを取り扱うことはできない。ただし、下水道管渠網などでの現象においては、かなり適用性があるのではないかと考えている。したがって、今後は大規模模型実験結果や実施設でのモニタリング結果等をもとに本解析手法の適用条件を明確にしていける必要がある。また、都市域における効率的な雨水排水施設再整備計画の策定に向けて、著者らによる雨水流出モデル⁷⁾、地表氾濫解析モデル⁸⁾の研究成果とあわせてトータルな都市雨水解析システムの構築を目指したい。

参考文献

- 1) Cunge, J.A. and Wegner, M. Numerical Integration of Bane de Saint-Venant's Flow Equation by Means of an Implicit Scheme of Finite Differences. Applications in the Case of Alternately Free and

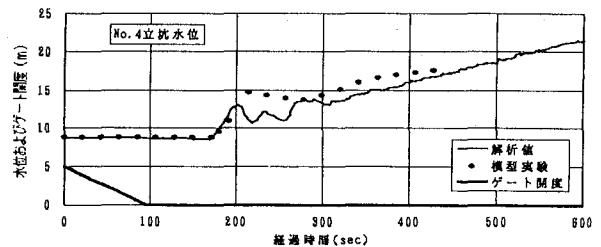


図-10 解析水位と実験水位の比較 (続き)

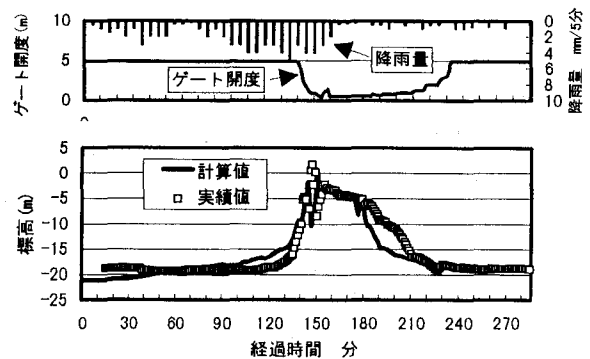


図-11 実績降雨の流入渠水位の比較

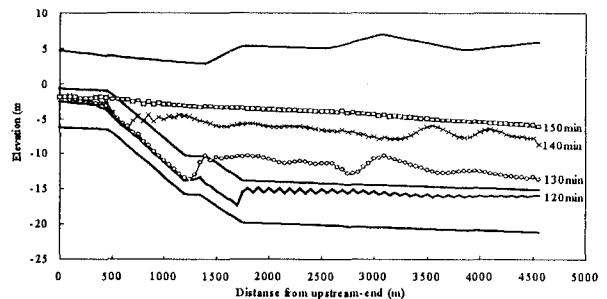


図-12 実績降雨時の計算による水面形

Pressurized Flow in a Tunnel, La Houille Blanche, No.1, 1964.

- 2) Song, C.C.S., Cardle, J.A. and Leung, K.S. Transient Mixed Flow Models for Storm Sewer, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.109, No.11, pp.1487-1503, 1983.
- 3) 細田尚・多田彰秀・井上和也・北原政宏: 管路・開水路境界面の伝播を伴う急変非定常流の解析手法に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.503/II-29, pp.89-97, 1994.
- 4) 古川博彦・山本直史・松本秀樹・小川浩紀: 地下河川水理解析システム QuickFlow の開発, KUBOTA TECHNICAL REPORT, No.31, 1996.
- 5) 日本機械学会編: 流の数値シミュレーション, コロナ社
- 6) 岡部健士・天羽誠二・石垣昌邦: 常流・射流の遷移を伴う不等流の数値計算法について, 水工学論文集, 第36巻, 1992.
- 7) Hirai M., S.P. Zhang and K. Asada: Re-construction Planning of Drainage System Considering Flow Detention Effect of Pipe Network, The 6th Int'l Conf. on Urban Storm Drainage, 1993.
- 8) 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.

(1997. 9. 30 受付)