

流入量予測にもとづく広域大規模雨水排水系の最適運転の実績

大阪市下水道局 ○須賀 増幸 小林 孝之 田代 栄治

雨水ポンプ場への流入水は流域の降雨状況により、短時間に大幅に変動する。これに対し、ポンプの起動停止にはある程度の時間を要するため、強度の降雨時には迅速な運転対応が必要となり、オペレータには強い緊張がしいられる。これらのことから、流入量を予測し最適なタイミングでポンプを起動停止することは、ポンプ場の運転にとって重要な問題であるが、従来はオペレータの知識と経験に依存してきた。大阪市では、弁天抽水所(ポンプ場)において、オンラインでの流入量予測とそれに基づくポンプ運転ガイドを導入した。流入量予測の手法としては、過去の実績データに基づく統計的手法と管渠内の流量や水位計測値による水理学的手法が考えられたが、実績データが不要であり、精度の高い予測が可能な水理学的手法を採用した。以下に流入量予測及びポンプ運転ガイドと、予測に基づく運転実績について報告する。

1. 弁天抽水所の概要

大阪市では、市街化の進展に伴う雨水流出量の増大や、地盤沈下などによって、下水道が整備された区域においてもなお浸水する箇所があり、下水道幹線の築造やポンプ場を増強する等の浸水対策を最重点とする下水道整備計画を進めているところである。弁天抽水所は、その一環として建設されたもので上町台地東側の約1200haを対象とし、総延長約14Km、最大内径6mの天王寺～弁天幹線により、既設管路からの溢流水として集められた雨水を地下約30mに設置された合計容量57.5m³/Sの大容量ポンプによって大川(旧淀川)へ放流するものである。幹線の下流側約3Kmの区間は管路貯留の役割も持ち、約6万m³の貯留容量を有する。

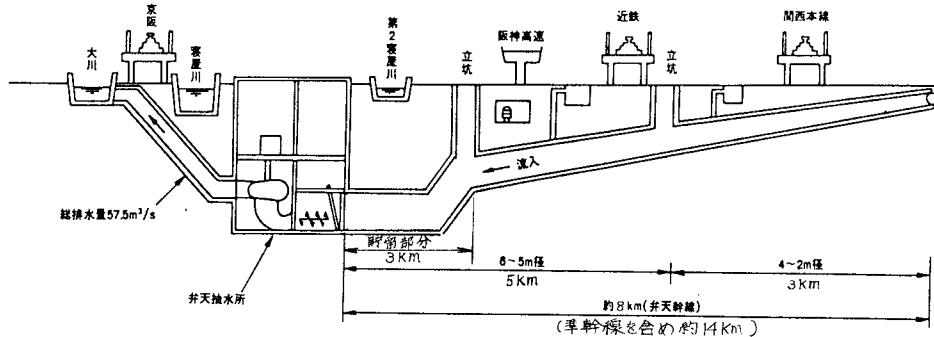


図1. 天王寺-弁天幹線・弁天抽水所模式図

2. 流入量予測

2-1 予備検討

弁天抽水所への流入量予測導入にあたっては、流入幹線・ゲート・沈砂池を含んだ、水路全長60mに及ぶ実物模型を作成し、計算機による数値計算プログラムの検証を行なった。

図2に計算値と実験値と比較を示す。吸水槽、各サージタンクの水位変化は計算値と実験値がよく一致し、開水路から閉水路への移行速度も、実用的に高い精度で一致することを確認した。尚、図において吸水槽は沈砂池を、サージタンクは立坑を模したものである。

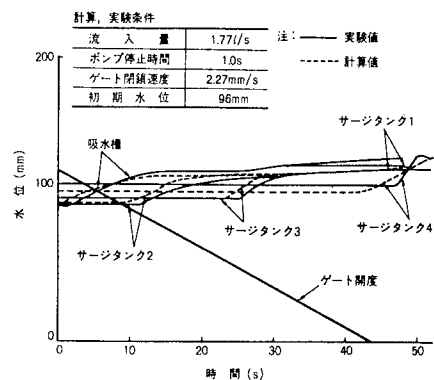


図2. 模型実験結果と計算値の比較

2-2 流入量予測システムの構成

弁天抽水所における流入量予測システムは、流域の雨量、管渠内の水位・流速及びポンプ吐出圧等をテレメータ等を介して計算機に入力し、60分先迄の流入量・水位の分単位予測とポンプ起動停止時刻・台数ガイドをCRTディスプレイに表示するものである。その中心となる流入量予測とそれに基づくポンプ運転ガイド計算の流れ図を図3に示す。降雨や幹線への流入の開始により、流入量予測が開始される。この際、幹線内の水の初期状態を求めるため、初期定常流計算を行なう。横流入量計算は、幹線への流入量を求めるものであり、他幹線からの溢流量を数地点で測定し、それを管渠計画容量で比例配分することによって全地点での流入量を計算する。これらの条件から、現状のポンプ運転継続時の水位と流入量の予測値を幹線内の水理現象を非定常流計算し、60分先まで求める。ここで、流入量としてはポンプ運転の影響を受けない管路貯留部上流端の流量を採用する。この流入量と管路貯留部分の貯留量をもとに、ポンプの最適運転スケジュールを計算する。ここで求めたスケジュール通りの運転を行なった場合に、水位・流量が目標範囲に入るかどうかを確認するため、貯留部分以降の非定常流計算を再度行ない、必要に応じて起動停止時刻の修正やスケジュール全体の再計算のフィードバックを行なう。

これらの計算は5分周期に行なわれ、結果はCRTに表示されると同時に、事後解析用として計測データと共にフロッピーディスクに格納される。

2-3 非定常流計算

流入量予測の中核を成す非定常流計算部分は、管渠内各部分の水理現象を時系列に解いていくものであり、精度の高さと任意の場所及び時間の流量・水位等を結果として取り出せる特長を持っている。

管渠の流れには、開水路の常流、開水路の射流及び閉水路の3状態があるが、従来これら3状態の混在する系のシミュレーション技法は未確立であった。オンラインでの流入量予測導入にあたり、実管路の水の挙動を高精度でシミュレーションする技法が必要となり、上記3状態の混在と境界移動を計算可能とする非定常流モデルを開発した。さらにこの非定常流モデルをオンラインへ適用するためには、大幅な計算時間の短縮と精度の確保を両立させる必要があった。このため、非定常流の解法である格子差分型特性曲線法における時間軸の差分格子幅を従来の全計算にわたり固定とする固定差分から、時間軸の差分格子幅を可変とし、各計算ステップ毎に最適な値を求めていく時間適応差分の技法を開発し、計算時間を従来法の1/10以下とすることができ、オンラインへの適用が可能となった。本技法は、(2-1)式に示す差分計算の安定条件を満足するため、従来は、時間軸の格子幅 Δt を充分小さくしており、計算時間が大きかった点と、式において等号成立時に事象の伝播時間と差分の時間幅が等しくなり計算精度が最良となる点に着目し、時間軸の差分格子幅最適化を図ったものである。尚、本技法は格子差分型特性曲線法全般に適用可能であり、シミュレーション技法における計算時間短縮と精度向上に広範な応用が考えられる。

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} \geq \left| \frac{dX}{dt} \right| \quad \dots (2-1)$$

ΔX : 距離軸の差分格子幅、 Δt : 時間軸の差分格子幅

以下に、非定常流計算の基本式と計算式の導出を示す。

(1) 基本式

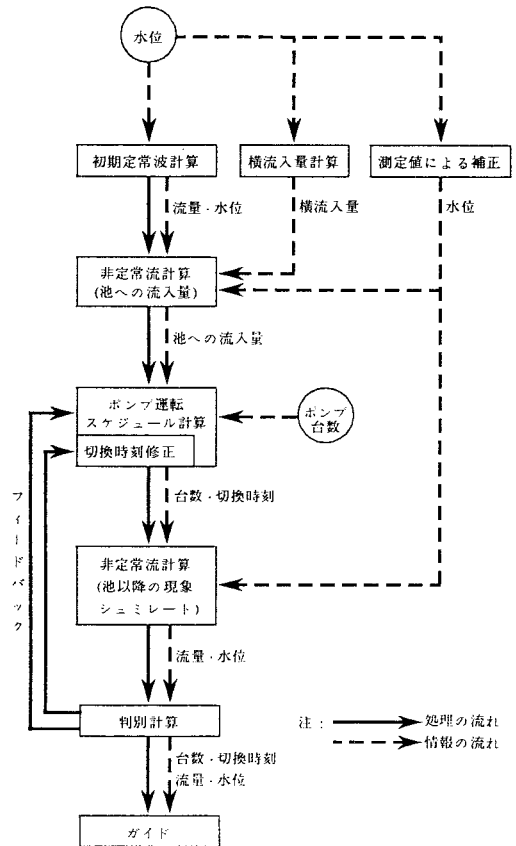


図3. 流入量予測に基づくポンプ運転ガイド流れ図

$$\text{エネルギー式} \quad \frac{\beta}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\alpha V}{g} \frac{\partial V}{\partial X} + \cos\theta \frac{\partial H}{\partial X} - \sin\theta + \frac{|V| \cdot V}{K^2 R^{4/3}} = 0 \quad \dots (2-2)$$

$$\text{連続式} \quad \frac{\alpha A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} = q \quad \dots (2-3)$$

(2) 開水路における解法

(2-2)、(2-3)式から、次の特性曲線方程式が導かれる。

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\alpha + \beta}{2\beta} V + C, \quad \frac{\cos\theta}{A_H} \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} - q \right) + \left(\frac{\alpha - \beta}{2\beta} V + C \right) \left(\frac{\beta}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial X} + S_f \right) = 0 \quad \dots (2-4)$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\alpha + \beta}{2\beta} V - C, \quad \frac{\cos\theta}{A_H} \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} - q \right) + \left(\frac{\alpha - \beta}{2\beta} V - C \right) \left(\frac{\beta}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial X} + S_f \right) = 0 \quad \dots (2-5)$$

$$C = \left\{ \left(\frac{\alpha - \beta}{2\beta} \right)^2 V^2 + \frac{g}{\beta} \frac{A}{A_H} \cos\theta \right\}^{1/2}, \quad S_f L = \frac{|V| \cdot V}{K^2 R^{4/3}}$$

(2-4)、(2-5)に示す特性曲線方程式を数値的に解くために、線形近似により次の2つの差分方程式を導く。

$$\left(\frac{\cos\theta}{A_H} \right)_j^n \left(\frac{A_j^{n+1} - A_j^n}{\Delta t} + \frac{Q_j^n - Q_{j-1}^n}{\Delta X_j} - \frac{q_j^n + q_{j-1}^n}{2} \right) + \left(\frac{\alpha - \beta}{2\beta} V + C \right)_j^n \left(\frac{\beta}{g} \frac{V_j^{n+1} - V_j^n}{\Delta t} + \frac{H_j^n - H_{j-1}^n}{\Delta X_j} + \frac{S_{fj}^n + S_{fj-1}^n}{2} \right) = 0 \quad \dots (2-6)$$

$$\left(\frac{\cos\theta}{A_H} \right)_j^n \left(\frac{A_j^{n+1} - A_j^n}{\Delta t} + \frac{Q_{j+1}^n - Q_j^n}{\Delta X_{j+1}} - \frac{q_{j+1}^n + q_j^n}{2} \right) + \left(\frac{\alpha - \beta}{2\beta} V - C \right)_j^n \left(\frac{\beta}{g} \frac{V_j^{n+1} - V_j^n}{\Delta t} + \frac{H_{j+1}^n - H_j^n}{\Delta X_{j+1}} + \frac{S_{fj+1}^n + S_{fj}^n}{2} \right) = 0 \quad \dots (2-7)$$

(2-7)式は常流の場合であり、射流の場合は代りに、(2-6)式でCを負とした式を用いる。

(3) 閉水路における解法

断面積の変化がなくなるため、(2-2)式のみとなり、閉水路区間で流れの方向に沿って積分し次式を得る。

$$Q_N^{n+1} - Q_N^n = - \frac{g}{\beta M} \left(S_f L + H_d N_2 - H_d N_1 \right), \quad M = \sum_{i=N_1}^{N_2} \frac{\Delta X_i}{A_i}, \quad S_f L = \sum_{i=N_1}^{N_2} S_{fi} \Delta X_i \quad \dots (2-8)$$

記号・略号の説明

H : 水位	Q : 流量	n : 時間軸格子点番号	A_H : dA/dH
K : 1/粗度係数	A : 流水断面積	j : 距離軸格子点番号	N_1 : 閉水路先頭格子点番号
V : 流速	R : 径深	α : エネルギー係数	N_2 : 閉水路終端格子点番号
t : 時間	X : 水路長さ	β : 運動量係数	H_d : 水頭
θ : 水路勾配	q : 横流入量	g : 重力加速度	

3. 運転実績

弁天抽水所は、昭和57年3月31日竣工後、流入量予測に基づくポンプ運転ガイドによって、満足すべき運転実績を積み重ねつつある。流入量予測は、通水当初から行なわれているが、実績データの解析により、幹線管渠の水力パラメータ及び、幹線への横流入パラメータの調整を数回行ない、より一層の精度向上を図っている。

図4、及び図5に最近の実績データの代表例を示す。これらは、フロッピーディスクに格納された実績データを大型計算機により解析したものである。図において、流入渠水位は、沈砂池流入ゲート一次側の水位であり、+で結ばれた線が実績値を、その他の線が5分後から60分後迄の予測値を示す。ポンプ吐出量は、運転台数も読み取ることができる。降雨強度は、流域内各地点における1時間雨量を示す。

図4の例は、1時間5mm程度の比較的弱い降雨時であり、水位の予測と実績はよく一致しており、ポンプは1台が1時間強運転されている。図5の例は、1時間20mm程度の降雨時である。ただし、この場合は、観測点による降雨のばらつきが大きい。予測結果は、図4と同様に実績とよく一致している。ただ、降雨が強くと、ポンプ吐出量が大きくなった時に若干の誤差がみられる。ポンプは1台運転を1時間程度行なった後、2台運転となり、その後1台運転となった。

以上述べた代表例他、昭和58年6月から同年9月の間の28回の降雨データの解析結果から、下記が結論づけられる。

(1) 水位の予測と実績はよく一致する。

(2) ポンプの運転時間及び切換回数は、1回の降雨における平均でそれぞれ1.1時間、1.2回と従来に比べ低く抑えられている。尚、水位の予測については、代表例で示したように、20mm/時間程度以上の降雨時に多少の誤差が見られるがポンプ運転には支障とならない。

4.まとめ

弁天抽水所は、流入量予測にもとずいたガイダンスによる最適運転に入り、満足すべき実績成果をおさめつつある。

今後、実績データの解析を進めることにより予測精度をさらに向上させることが期待される。

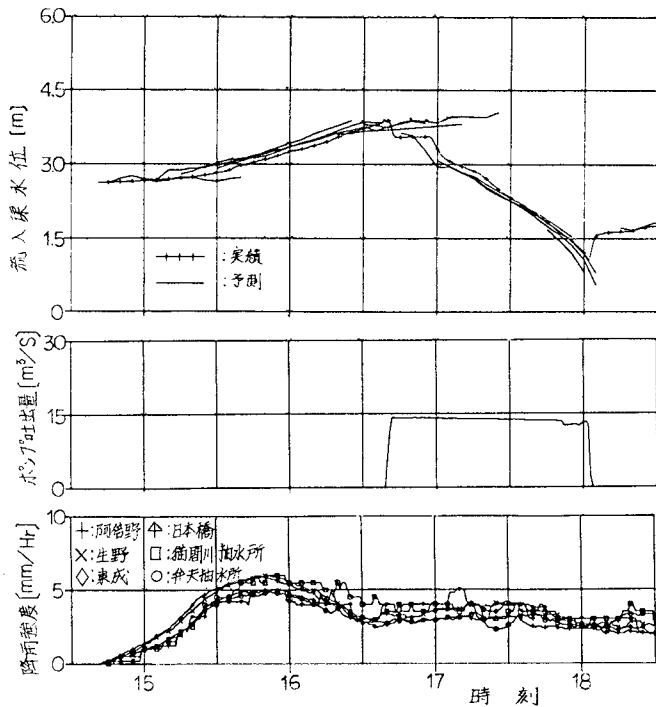


図4. S58年9月27日の運転実績

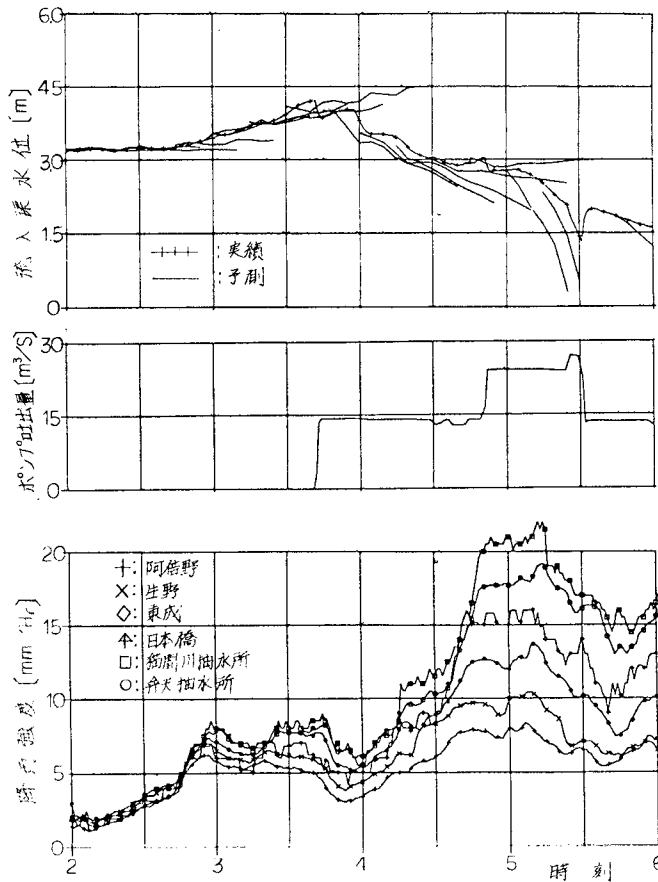


図5. S58年9月28日の運転実績