

[12] 雨水排水系における流入量予測とゲート・ポンプ・バルブの協制御

(株)日立製作所 システム開発研究所 ○塩谷 真
 “ システム事業部 嶋内 繁行
 “ 大みか工場 小笠原 均

1. はじめに

日本の多くの都市では、汚水と雨水を同じ管渠に流す合流式下水道を採用している。そのため、ポンプ場への流入量は降雨時と非降雨時とでは数倍も異なる。ところで、ポンプ起動や弁閉閉にはかなりの時間がかかる（5～10分）こと、および、降雨時の流入水量の増加速度は大きいため、管渠の貯留容量が小さいと、ポンプの起動開始の2～3分の遅れが管渠を溢れさせる可能性がある。このことを考慮すると、短時間（1時間未満）内における流入量予測が溢水の生じないポンプ運転制御に必要である。そこで、短時間先までの予測を行なうとしたらどれ位の精度で可能か、また、どれ位の精度の予測値がポンプ運転制御にとって必要なかを実際のポンプ場のデータ解析により検討したのでその概要を述べる。ところで、雨水排水を兼ねた下水ポンプ場では、路上溢水だけでなくポンプ場自体の冠水を防ぐことも重要な使命の一つである。そこで、複数台のポンプないしはその駆動源が故障したり、計画流入量以上の雨水が一時に流入した場合でも、その使命をできる限り果せるように、流入ゲート開度や開閉速度、ポンプの運転台数、バルブの開度を相互に関連づけて制御する協制御の一方を考えたのでその概要も本論文で述べる。

2. 流入量予測

2.1 予測の方法

我々は、先に、1点観測降雨量およびポンプの全揚水量を入力とし、1時間先までの平均流入水量（厳密には1時間先までに流入してくる水量の累計）を出力とし、重回帰分析手法により予測する方法を報告した¹⁾。そして予測の相対誤差の絶対値の平均が0.33以下、標準偏差は1.73以下で、更に、予測誤差の絶対値の平均は4.670 m³以下であり、それは、管渠の貯留容量（160,000 m³）に比べて十分小さいという結果を得た。今回の報告の予測方法は次式に示す重回帰分析手法で以前の報告と同様であるが、予測の単位時間長と時間スケールを各種変更しそれらの予測精度を比較検討した点異なる。

$$\hat{Q} = a_0 + \sum_{i=1}^I a_i x_i \quad (1)$$

$$\text{ここに、} a_i : \min_{a_i} \left(\sum_{n=1}^N (Q_n - \hat{Q}_n)^2 \right) \quad (2)$$

Q : 実測流入量（予測の基準変数）

\hat{Q} : 予測流入量

a_i : 回帰係数〔(2)式右辺括弧内を最小にするように決める〕

x_i : 説明変数（雨量や過去の流入量など、予測に使う変数）

$i = 1, \dots, I$: i 番目の説明変数を示す添字

$n = 1, \dots, N$: n 番目のサンプルデータを示す添字

重回帰分析を行なうにあたっては、全体として図1に示す手順をとった。

以下にその概要を述べる。

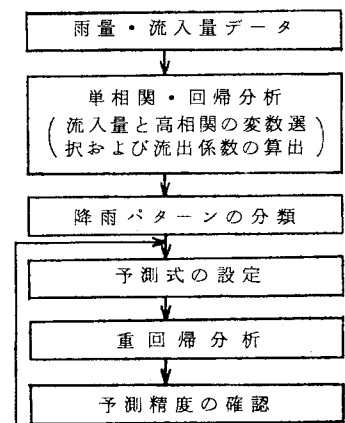


図1 流入量予測の手順

まず、単相関・回帰分析により降雨量と流入量の相関係数および流出係数を算出する。但し、流出係数は式、

$$Q(t) \cdot \Delta t = f_r \cdot R(t-\tau) \cdot \Delta t + A + Q_0(t) \cdot \Delta t \quad (3)$$

のような単回帰直線の形で定義されるものである。ここに、

$Q(t)$: 時刻 t における流入量
 $Q_0(t)$: 時刻 t における流入量ベース分
 $R(t-\tau)$: 時刻 t より τ 時間前の降雨量
 A : 排水区域面積
 f_r : τ 時間前の降雨に関する流出係数
 Δt : 単位時間長
 τ : 遅れ時間

f_r は、時刻 t から単位時間長 Δt 内における降雨による流入量が τ 時間前の Δt 内における面積 A の区域の総降雨量の何割に相当するかを示す値とみなすことができる。次に相関の高い変数を選択し、降雨強度で分類した降雨パターン毎にいくつかの予測式を設定し重回帰分析を行ない、予測精度の確認を行なう。

2.2 予測結果

単相関・回帰分析は、流入量と3地点の降雨量に関し、 $\Delta t = 10, 30, 60$ 分について行なった。そのうち、1地点に関する結果を図2に示す。図より相関係数は、 $\tau = 30 \sim 70$ 分の間にピークを持ち、平均1時間前後の遅れで降雨量のかんりの部分が流出してくると言える。流出係数 f_r は、排水区域面積 A (1600 ha) を用いて回帰係数から算出でき、各 Δt に対し最大で 0.25, 0.43, 0.52 となった。これは1降雨の開始から終了までの平均値に基づく流出係数に比べ時々刻々の流入量を推定するにはより役立つ数値と言える。

降雨量のうち相関の高い変数をいくつか選択し、それに現時点以前の流入量をいくつか加え、最大6説明変数の組合せを約100種類作り、重回帰分析による予測計算を行なった。この時、降雨を降雨強度3以上、1~4, 2以下(単位は mm/10min)の3パターンに分類して行なった。降雨強度 3 mm/10min以上の時の10, 20, 30分先の予測結果はそれぞれ、重相関係数は 0.94, 0.92, 0.89, 予測の相対誤差の絶対値の平均は 0.24, 0.35, 0.36, 予測誤差の絶対値の平均は 86, 105, 107 m^3/min であった。これらはポンプ1台分の吐量(約 200 m^3/min)のそれぞれ 43.0, 52.5, 53.5 %であり、ポンプ1台の待機運転を前提とすれば、十分実用に耐える値であると言える。10分先予測のグラフ例を図3に示す。また、その他の主な予測結果を重相関係数につき表1に示す。その他の降雨強度のパターンでは予測精度が表2に示すように高くなり、やはり実用に耐えることが言える。

表1 重相関係数(降雨強度3mm/10min以上) 表2 弱降雨強度時の精度向上度(誤差絶対値減少率)

予測 スケール	単位時間長	10分	20分	30分	40分	60分
10分先	0.94	—	—	—	—	
20分先	0.88	0.92	—	—	—	
30分先	0.82	—	0.89	—	—	
40分先	0.76	0.81	—	0.87	—	
60分先	—	0.63	0.67	—	0.79	
80分先	—	0.44	—	—	—	
90分先	—	—	0.44	—	—	
120分先	—	—	0.29	—	—	

予測 スケール	単位時間長	10分	20分	30分
10分先	$\frac{1}{20} \sim \frac{1}{10}$	—	—	—
20分先	—	$\frac{1}{7} \sim \frac{1}{6}$	—	—
30分先	—	—	$\frac{1}{6} \sim \frac{1}{5}$	—

重相関係数についてはほぼ同じ

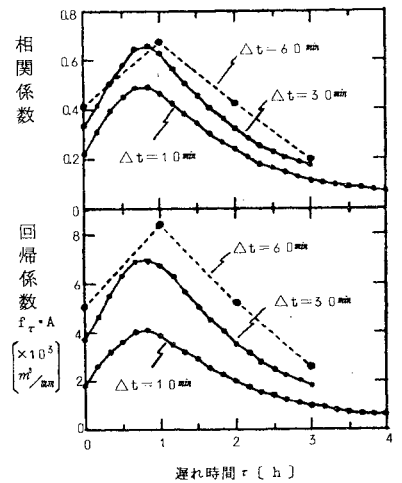


図2 流入量と降雨量との相関係数と回帰係数(流出係数)

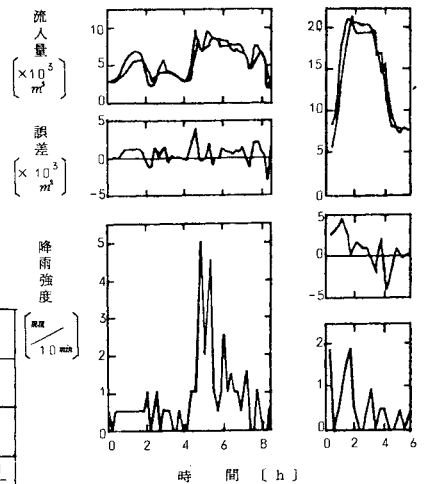


図3 予測結果例(10分先予測)

3. ゲート・ポンプ・バルブの協調制御

3.1 協調制御の概要

雨水排水用ポンプ場においては、下記の要請があると考えられる（図4参照）。

- (1) ポンプが1台でも機能する限りその能力一杯の排水を続けたい。
- (2) ゲートの2次側にあるポンプや駆動機等の設備類が水没して長期にわたって使用不能にならないようにする。すなわち、2次側水位 H_2 がその危険水位に達しない。
- (3) ゲートの1次側にある道路や排水区域に水を溢れさせない。すなわち、1次側水位 H_1 がその危険水位に達しない。

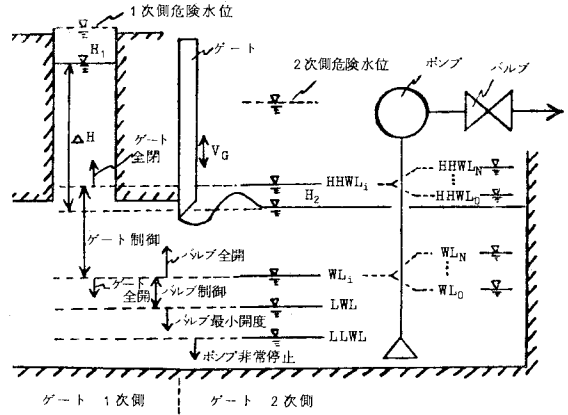


図4 ゲート・ポンプ・バルブおよび各種水位の関係

これらの要請をできる限り満足させるために、流入量が機能しうるポンプの排水能力以上になった時、ゲートを制御し流入量制限を行ない、それを従来のポンプとバルブの制御に協調させるようにする。ゲート開閉速度は開閉速度とゲートの1次側、2次側水位との間の次の関係を考慮して決める。すなわち、(1)ゲート閉鎖速度が遅いとサージによるゲート1次側の水位上昇は少いが2次側の水位上昇は多く、逆に、(2)閉鎖速度が速いとサージによる1次側の水位上昇は多いが2次側の水位上昇は少ない、(3)ゲート1次側と2次側の水位差が大きいと水圧の差によりゲートに大きな力がかかり、ゲート開閉速度を遅くするように作用する。

協調制御の概要は図5に示すようにポンプ制御、ゲート制御それぞれにバルブ制御から成り、通常はポンプ台数制御、ゲート全開、バルブ開度制御のモードにある。ポンプ台数制御とバルブ開度制御はゲート2次側水位 H_2 がポンプの運転台数（又は台数相当吐出量）に応じて決められた範囲に保たれるように動作している。水位 H_2 が特定の値を越えるとポンプ全台非常停止、ゲート開度制御、ゲート全閉、バルブ全開、バルブ最小開度、等のモードに移行する。

3.2 協調制御の詳細フロー

詳細を図4の記号、図6のフローに従い説明する。

- (1) ゲート2次側水位 H_2 がポンプ運転台数 i ($=0 \sim N$) に応じたゲート制御移行水位 $HHWL_i$ を上まわった時、ゲート制御に入る。(2)それ以前はゲートは全開とする。

- (3) 一たんゲート制御に入ると H_2 がポンプ運転台数 i に応じた上限水位 $HHWL_i$ と下限水位 WL_i の間に入るよう

- にゲート開度を制御する。(4)(1)のとき、運転台数 i が0の時は(3)にかかわらず、ゲート全閉とする。(5)ゲート制御をしたにもかかわらず H_2 が $HHWL_i$ を上まわった時は下まわるまでゲート全閉にしておく。(6)ゲート制御をしたにもかかわらず H_2 が WL_i を下まわった時は上まわるまでゲート全開にしておく。(7)ゲート閉鎖速度 V_G は大小2種類用意し、ゲート1次側水位 H_1 と2次側水位 H_2 の差 ΔH の絶対値がその閾値 ΔH_0 よりも大きい時は小さい速度を、小さい時は大きい速度を使う。(8)従って、制御に入る初期において ΔH の絶対値が ΔH_0 より小さければゲート1次側に大きなサージが発生しないゲート開度まで高速で一気にゲートを閉じ、次にそれ以後 ΔH の絶

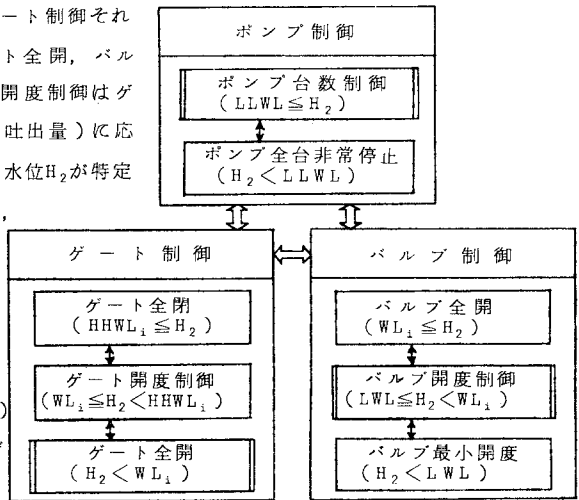


図5 ゲート・ポンプ・バルブの協調制御の概要

対値が大きくなったら低速でゲート開閉の制御をするというように使う。これにより、初期の制御を素早く行なうことができる。(9)運転台数 i が 0 になった時でも条件さえ満足すれば高速で一気にゲートを全閉する。(10)移行水位 $HHWL_i$ は、 $|\Delta H|$ が ΔH_0 よりも大きい時は低く決め、小さい時は高く決める。これにより、閉鎖速度 V_G が小さくても H_2 の上昇を少なく保て、設備類の水没を防げる。(11)移行水位 $HHWL_i$ は一般には運転台数 i が少ない程低く決める。すなわち、 $HHWL_{i+1} \geq HHWL_i$ のように決める。これにより、流入量増加の際にポンプの合計吐出能力が小さい場合でも早目にゲートによる流入量制限ができる。(12)下限水位 WL_i は一般には運転台数 i が少ない程低く決める。すなわち、 $WL_{i+1} \geq WL_i$ のように決める。これにより、流入量減少時にポンプの合計吐出能力が大きい場合でも早目にゲートを開くことができ、ポンプの空気吸入を防ぎ易くなる。(13) H_2 が下限水位 WL_i を上まわる時はバルブ全開とし、吐出量が多くなるようにする。(14) H_2 が WL_i と低水位 LWL の間にある時はバルブ開度を制御しその状態を保つようにする。(15) H_2 が低水位 LWL を下まわる時は上まわるまでバルブ開度を最小に保つ。(16) H_2 が低水位 LWL を下まわる時はポンプを全台非常停止させる。

以上、ゲートとバルブ関係を中心に述べたが、通常時のポンプの台数制御方法および(14)のバルブの制御方法は特に限定せず、各種の方法を適用できる。

3.3 故障時の運転

ポンプ又はその駆動源が故障した場合にどのような運転をとるかにつき、同容量ポンプ 5 台、発電機 2 台 (1 台でポンプ 3 台駆動可能) の場合を想定して検討した。結果を表 3 に示す。ゲート制御による流入量制限を有効に利用した例である。

4 おわりに

雨水排水ポンプ場の運転に役立つ程度の降雨時の短時間先流入量予測が可能かどうか検討するとともに、路上溢水やポンプ設備冠水を防ぐためのゲート・ポンプ・バルブ制御の一方法を提案した。その結果、10、20、30 分先の予測では予測誤差の絶対値の平均がポンプ 1 台分の吐出量のそれぞれ 4.3.0、5.2.5、5.3.5 % であり、ポンプ 1 台を待機運転させれば実用になるものと言える。また、ゲート・ポンプ・バルブの協調制御を利用すれば、設備の故障時や過大流入量時にも流入側にサージを起こすことなくポンプの排水能力を最大限に生かした運転が可能となる。

5 参考文献

- 1) 加藤, 他: 流入下水水量の変動パターンの解析, 第 12 回下水道研究発表会 (昭 50-4)
- 2) 大成, 他: 流入量予測に基づくポンプの準最適運転台数決定方法, 第 13 回下水道研究発表会 (昭 51-5)

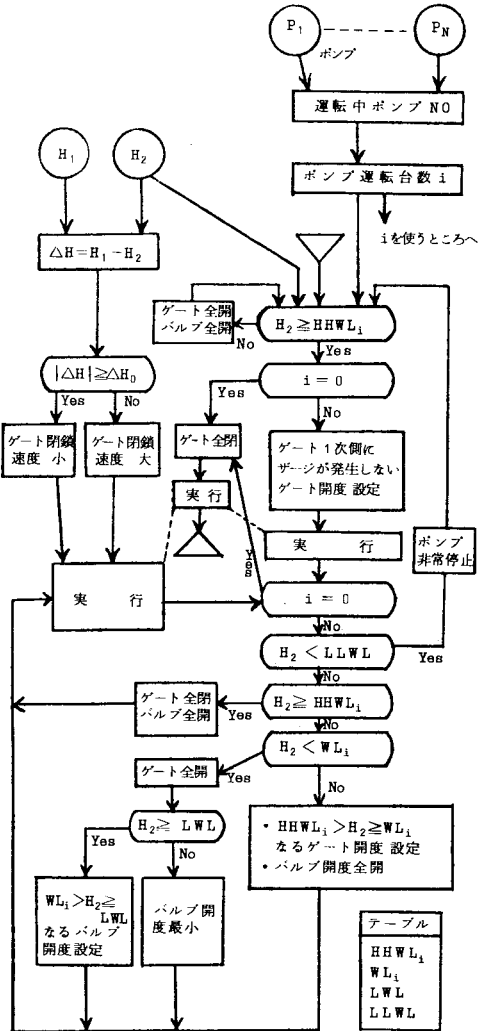


図 6 ゲート・ポンプ・バルブの協調制御の詳細フロー

表 3 故障時の運転

運転台数 ポンプ	1 台		2 台		
	1台	2台	3台	4台	5台
1			・他のポンプ起動		
2					・ゲート開度制御
3					・他のポンプ起動 ・ゲート開度制御
4					・ゲート全閉
5					
発電機台数	1 ・他の発電機起動 2 ・他のポンプ起動		1 ・他のポンプ起動 2 ・ゲート開度制御		