

## カルマンフィルタを用いた管網末端圧制御

窪田 真和\*、伊藤 修\*、黒谷 憲一\*、蓮本 了遠\*\*

\*富士電機株式会社

東京都日野市富士町1番地

\*\*富士電機株式会社

京都府京都市中京区烏丸通り蛸薬師上ル七観音町 637

### 概要

配水管網の圧力制御の必要性が叫ばれてから久しい。最近では、直結給水の実現が必要となり、さらに配水管網の圧力制御の必要性が高まっている。配水管網の圧力制御には、従来から管網計算を用いた方法や、末端の圧力を計測しフィードバックで制御を行う方法、ニューラルネットワークを応用した方法が提案されている。ここでは、比較的計算量の少ないカルマンフィルタを用いて配水管網の圧力を操作する上流点から圧力を制御する末端までの管路を等価なひとつの管路と置き、その管路抵抗係数を推定し、末端圧制御に応用することを検討した。ここで実際の計測値を用いてシミュレーションを行い、その効果を確認した。

### キーワード

配水管網、末端圧制御、カルマンフィルタ

#### 1. はじめに

配水管網の圧力が高いと漏水が増え、漏水は貴重な浄水の損失になるばかりでなく、有収率の低下、さらには道路陥没などの災害にもつながる。一方、圧力が低いと必要な水が十分に供給できない給水不良や、さらに負圧になると汚水の吸い込み等による水道水汚染が起こる。そこで、効果的な配水管網の水圧管理が欠かせない。しかし、管路が圧力に対して振動的な特性を持っていることや上流の圧力操作点から末端の圧力制御点までの圧力の伝わる経路が複雑であることなどから、配水管網の末端の圧力を上流の操作点で安定に制御することは難しい。従来の方法としては、管網計算による方法や、PID制御アルゴリズム等を用いた実際の末端圧力の計測値によるフィードバック制御、新しいところではニューラルネットワークを用いた方法も考えられる。しかし、管網計算を利用した方法では、管路の更新や、需要家の増加に対応して管網計算に用いるデータの更新を適宜行う必要がある。また、PID制御等によるフィードバック制御では昼間と夜間の需要量の差が大きいため管路の特性が変化し、安定した制御を実現することが困難である。また、ニューラルネットワークによる方法では、初めの学習のための計算量も多く、さらには経年変化による管路の更新、需要家の増加に対応して、適当なタイミングで学習を行う必要がある。このために比較的計算量が少なく、予測誤差により予測式の係数を適宜変化させる適応型の予測手法であるカルマンフィルタを用いて等価な管路抵抗係数を推定し、上流の操作点で圧力を操作することで配水管網の末端圧力を目標値に制御する方式を提案し、その効果をシミュレーションにより確認した。

## 2. 計算方法

複雑な構成をしている配水管網において、圧力を操作する上流側の弁の出口と圧力制御を行いたい末端との間を等価的に一つの管路と考えると、弁の地点で計測できる流量を用いて次の式で表される。

$$P_e = P_b - r \cdot Q^\alpha + c \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $P_e$  : 末端圧力、 $P_b$  : 弁の二次圧力、 $r$  : 等価管路抵抗係数、 $Q$  : 弁流量、 $\alpha$  : 管路損失計算累乗の指数(1.85または2)、 $c$  : 弁と末端圧力監視点との標高差を表す。

末端の目標圧力を  $P_e = P_{e0}$  とおくと、弁の地点での流量  $Q$  が計測または予測により求めれば、弁の出口圧力の設定値  $P_{bk}$  は(1)式から次のように求めることができる。

$$P_{bk} = P_{e0} + r \cdot Q^\alpha - c \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1)、(2)式では上流の圧力操作点から末端の圧力制御点までの複雑な管路を等価的に一つの管路抵抗係数  $r$  で表した。ところが、圧力、流量は水の圧縮性に起因する振動的な特性を持っている。さらに圧力、流量の計測値にはノイズが加わるために、(1)式から逆算される等価においた管路抵抗係数  $r$  は圧力、流量の影響により大きく変動する。これによって、圧力操作点の出口圧力設定値、さらには末端の圧力が大きく変動することになる。そこで、下に示すように計測できる  $P_e, P_b, Q$  からカルマンフィルタを使って、等価においた管路抵抗係数  $r$  を推定する。

ここで、

$$y(k) = P_b(k) - P_e(k) + c \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$x(k) = Q^\alpha(k) \quad \dots\dots\dots (4)$$

とおき、(1)式を(5)に書き換える。

$$y(k) = r(k) \cdot x(k) + e(k) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、添え字  $k$  は離散化した時間であり、 $e(k)$  は測定誤差や近似誤差などのノイズを示す。

(5)式にカルマンフィルタを適用すると等価管路抵抗係数  $r(k)$  を次のように表すことができる。

$$r(k) = r(k-1) + \sigma^{-2} \{y(k) - x(k) \cdot r(k-1)\} \cdot P(k) \cdot x(k) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$P(k) = P(k-1) - \{ \sigma^2 + P(k-1) \cdot x^2(k) \}^{-1} \cdot P^2(k-1) \cdot x^2(k) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $\sigma^2$  はノイズ  $e(k)$  の分散、 $P(k)$  は  $r(k)$  の推定誤差分散である。添字  $k-1$  は1ステップ前を示す。

(6)式によって計算された管路抵抗係数  $r(k)$ 、目標とする末端の設定圧力  $P_{e0}$ 、現在の弁流量計測値  $Q$  を使って、(2)式から弁の出口圧力設定値  $P_{bk}$  を求める。ただし、流量の計測値にはフィルタをかけ、短時間の変動や計測ノイズは取り除く必要がある。このようにして求めた弁の出口設定圧力になるように弁開度を制御すれば末端圧力が目標値に制御できることになる。この計算を任意の時間単位で逐次計算する。

この方法によれば、等価管路抵抗係数  $r$  を逐次推定するので、管路の更新、変更による経年変化や渇水時の配水区域の変更にも対応でき、末端圧力制御に使用出来る。

## 3. 計算結果

これまでに説明した計算方法により、実プラントの計測値を使い計算した結果を示す。計算に使用したのはある市の配水量と配水池近くの圧力制御弁の出口圧力、この時の配水管網の末端圧力である。計算期間は、9月1日から10月中旬の約1月半の計算を1時間間隔で行った。管路損失計算累乗の指数  $\alpha$  は Hazen-Williams の式に従い 1.85 とした。図1は(6)式により逐次推定された管路抵抗係数と(1)式をもとに逆算したみかけの管路抵抗係数計算値の1時間ごと5日間の比較結果である。図2に弁の流量を示す。これらの図から管路抵抗係数は、流量により変動することが明らかである。図3には逐次推定された管路抵抗係数と二次圧力、流量の実測値を(1)式に与え、計算した末端圧力の推定値と実測値の5日間の比較を示す。この図から、推定した管路抵抗係数から末端圧力が推定できていることがわかる。図4は末端圧力を0.25MPa一定値として、(2)式により求めた二次圧力の設定値と制御を行っていない実測の二次圧力である。この図

から末端の圧力を 0.25MPa 一定にするためには弁の二次圧力で約 0.3MPa 下げられることがわかり、さらに流量によってその設定圧力を変える必要のあることがわかる。

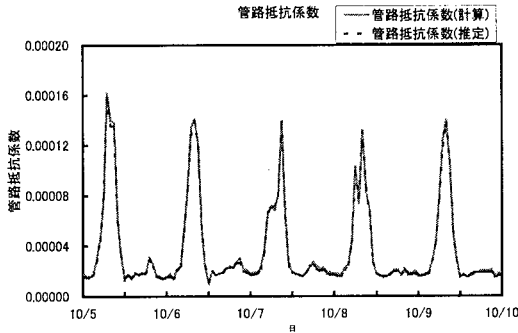


図1 管路抵抗係数の計算値と推定値

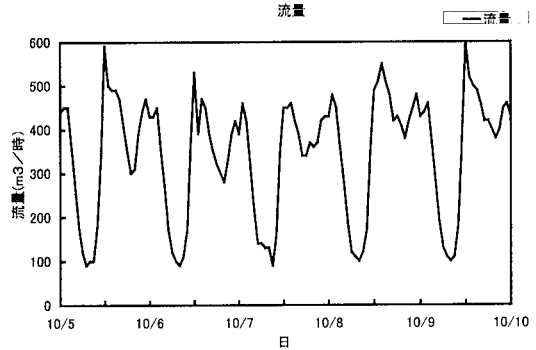


図2 弁流量の実測値

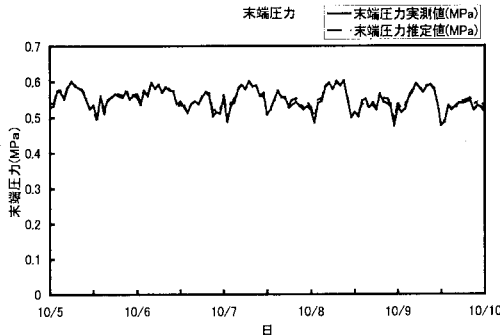


図3 末端圧力の実測値と推定値

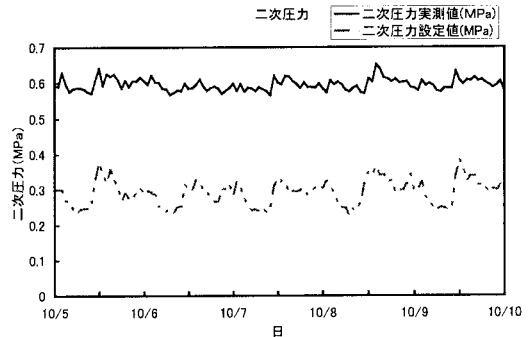


図4 末端圧力の実測値と推定値

これらの計算結果から、計算開始から 700 回程度の計算で管路抵抗係数の推定が行えることがわかる。

#### 4. 制御への適用

ここでのシミュレーションは過去の蓄積してあるデータからシミュレーションを行ったので1時間間隔のデータを使用した。実際のオンラインでの運用では1分間隔のデータを使用すれば1日分のデータでも管路抵抗係数の推定が可能である。

オンラインで計測された実測値を用い、この計算を定周期で行うことにより逐次、等価管路抵抗係数が適応修正されるので管路の更新、需要量の増加にも適応していくことになる。

さらには、計算に使用する弁の1日の流量を需要予測等によってあらかじめ計算できれば、1日の弁の二次圧力のスケジュールを立てることも可能となる。これらの方法を示したブロック図を図5に示す。

ここでは、圧力制御を弁で行う場合について記述したが、圧力制御をポンプで行う場合も同様で、求めた二次圧力になるように、ポンプ台数、ポンプ回転数を制御することにより、設定した末端圧に制御できることになる。

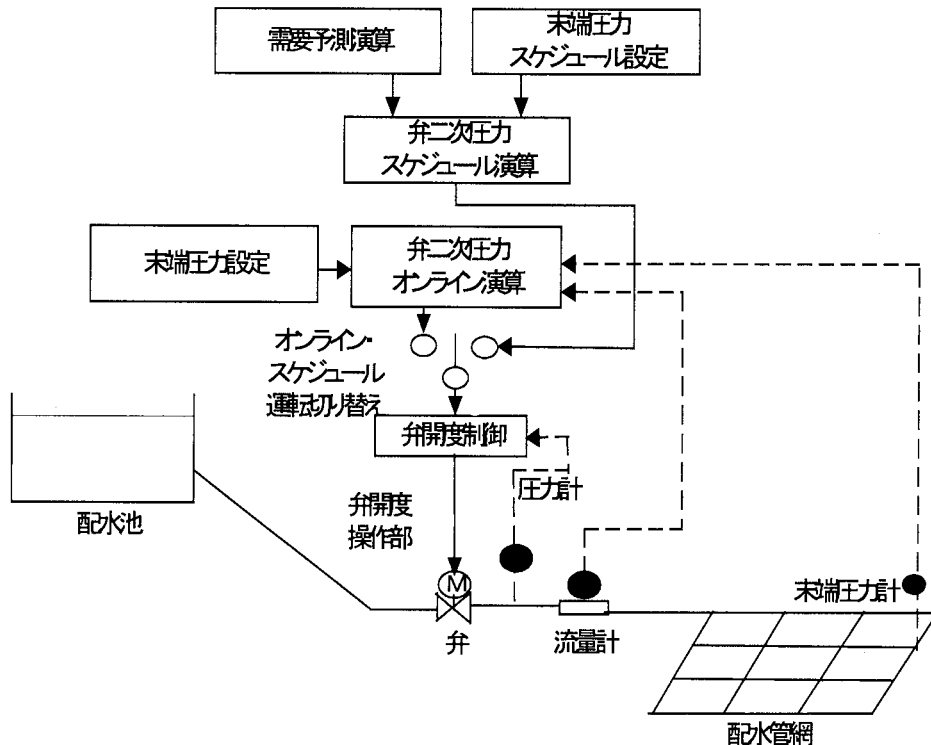


図5 制御ブロック図

## 5. おわりに

配水管網の圧力制御は、今後の直結給水の実現、有収率の向上には不可欠な技術である。ここでは、計算量の少ないカルマンフィルタを用いて、配水管網の末端圧力制御の実現が可能となることをシミュレーションで確認できた。

この方式によれば、夜間の需要量の少ない時間帯には末端圧力の設定値を低くすることで、漏水量を減少させることが可能となる。さらに火災時のように一時的に配水管網の圧力を高める場合の制御や、湯水時のように給水量を制限するために、配水管網の圧力をできるだけ下げることが可能となる。

今後は、実プラントでこの方式に従い運用を行い実際に制御可能なこと、管路の更新や需要量の増加等による特性の変化にも適応できることを確認する予定である。さらには、この方式により圧力制御を行った場合の漏水量の減少効果を実プラントで検証を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 窪田真和ほか：管路抵抗係数の推定による配水管網末端圧力制御方法(2000) 第51回全国水道研究発表会講演集 pp284-285