

## 渇水時の減圧給水制御シミュレーション

○栗栖 宏充<sup>1</sup>、福本 恭<sup>1</sup>、田所 秀之<sup>1</sup>、薦田 憲久<sup>2</sup>

<sup>1</sup>. (株)日立製作所

<sup>2</sup>. 大阪大学

**概要:** 減圧給水は、渇水対策の一つであり、通常より低い圧力レベルで給水することによって、節水効果を引き出すものである。この効果の定量的見積もりが困難であるため、ポンプやバルブの制御は多くの場合経験則によっている。通常よく用いられる管網解析は、需要分布を既知として全体の圧力流量分布を求める。減圧給水は、与えるべき節点需要が供給圧力の関数になるという前提に基づくもので、通常のモデルが当てはまらない。そこで、節点の供給圧力と取り出し水量との関係を導入することによって、渇水時の管網解析と制御演算の手法を構築した。さらに、実管網データを用いたシミュレーションによって有用性を示した。

**キーワード:** 管網解析、配水制御、渇水、シミュレーション

### 1 はじめに

渇水対策は、自主節水を要請する広報による需要抑制に始まるが、それでも水が不足する場合、減圧給水の実施となる。この際に問題となるのは、給水の安定性および公平性の確保である。高台地域など普段から水圧の低い部分にしわ寄せが行く傾向が出るため、それを最小限にできるようにポンプの吐出圧を下げたりバルブを絞ったりして、きめ細かな調整をする必要がある。ポンプやバルブの操作は、互いに影響しあい管網全体に影響するため、その挙動をよく把握する必要がある。実際に減圧給水を実施する時には、需要低減現象の解析に加え、配水拠点での減圧幅に対する需要低減効果の定量的な見積もりに基づいて、所望の効果を引き出すには送出圧力をどのように制御すればよいかについての指標が得られることが望ましい。本研究では、減圧給水と需要低減効果の関係を明確にするための管網解析方法と、それに基づいた配水制御方法の構築を試みた。

### 2 従来の管網解析モデルと渇水時の問題点

管網解析とは、管網内の水流を定常流とみなし、すべての節点と管路でそれぞれ成立する以下の流量収支式(1)と圧力平衡式(2)からなる連立方程式を解くことによって流量および圧力の分布を得るものである。

$$\sum_{j \in A^+(i)} x_j - \sum_{j \in A^-(i)} x_j = \begin{cases} -w_i & (i \in N_{IN}) \\ y_i & (i \in N) \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $N_{IN}$ は配水拠点、 $N$ はそれ以外の節点の集合、 $x_j$ は管路 $j$ の流量、 $w_i$ と $y_i$ は節点 $i$ の流入量と需要量である。 $A^+(i)$ および $A^-(i)$ は、それぞれ節点 $i$ を始点とする管路および終点とする管路の集合を表す。

$$P_{s(j)} - P_{e(j)} = (R_j |x_j|^\alpha + U_j |x_j|^\beta) \text{sgn}(x_j) \quad (j \in B) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $B$ は管路の集合、 $p_i$ は節点 $i$ の圧力、 $s(j)$ と $e(j)$ は管路 $j$ の始点と終点、 $\text{sgn}(x)$ は、 $x$ の符号を表す。 $R_j$ と $U_j$ は管路 $j$ の抵抗とそこに設置されたバルブの抵抗で、既知量とする。

平常時の解析では、需要量  $y_i$  はすべての節点で、圧力  $p_i$  は配水拠点で既知として与える。このとき方程式の本数と未知変数の個数が一致して一意に解が求められる。ここには、それぞれの節点で需要量を取り出すのに十分な圧力が保持されているという前提がある。供給圧力が不十分である場合には、需要に関わらず取り出される水量は供給圧力の関数になる。減圧給水はこの現象を利用するものであるから、需要量を既知として与えることはできず、上述のモデルが当てはまらない。

3 湯水時の管網解析および配水制御方法

前章で述べた問題点を解決するため、水圧不足時の取り出し水量の変化の要素を解析に組み入れる。一般に、ある需要節点に給水管が接続され、その先に給水栓が取り付けられているとき、節点での圧力を  $p$ 、地盤高を  $\bar{p}$ 、取り出される水量を  $z$  とすると次式が成り立つ。

$$p - \bar{p} = U' |z|^2 \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式は、前章で説明した圧力平衡式 (2) に相当する。  $U'$  も同様に抵抗を表し、以下の式で表される。  $D$  は給水管の直径、  $v$  は給水栓のバルブ損失係数、  $v'$  は給水管の摩擦損失を含めた諸損失の係数の和である。

$$U' = 0.08271D^{-4}(v + v') \dots\dots\dots (4)$$

前章のモデルと異なる点は、需要に応じて水量を取り出すという人間の挙動が直接関わるという点であり、これを次のようにモデル化する。この節点での需要を  $y$  とした時、需要者は、取り出し水量  $z$  がこれより大きいようであれば、等しくなるように給水栓のバルブを絞って、すなわち  $v$  を大きくして  $U'$  を調節する。逆に、取り出し水量  $z$  が十分に出ない、すなわち供給圧力が不十分な湯水時は、バルブを全開として  $v$  を 0 にして  $U'$  を小さく固定することにより、できるだけ水量が取り出されるようにする。上記モデルにおいて、それぞれの節点で諸損失の和を算定するのは困難であるから、所望の需要を取り出せる最低限の圧力を  $P'$  とおくと、(3) 式より、  $U'$  を小さく固定したとき、つまり減圧給水時の抵抗は、

$$U' = (P' - \bar{p}) / |y|^2 \dots\dots\dots (5)$$

と算出できる。以上、圧力と取り出し水量の関係を Fig. 1 に示す。

以上のモデルを取り入れ、湯水時は、式 (1) において既知量としていた需要量  $y_i$  を未知変数である取り出し水量  $z_i$  で置き換え、(3) 式がそれぞれの節点  $i$  で成り立つとした以下の方程式を解く。

$$\sum_{j \in A'(i)} x_j - \sum_{j \in A(i)} x_j = \begin{cases} -w_i & (i \in N_{IN}) \\ z_i & (i \in N) \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

$$P_{s(j)} - P_{e(j)} = (R_j |x_j|^\alpha + U_j |x_j|^\beta) \text{sgn}(x_j) \quad (j \in B) \dots\dots\dots (7)$$

$$p_i - \bar{p}_i = U'_i |z_i|^2 \quad (i \in N) \dots\dots\dots (8)$$

上記、非線形代数方程式の数値解法として、ここでは問題を等価な最小費用流問題に変換して解く方法を用いた。 Fig. 2 に示すように、最小費用流計算では、仮想流入点であるソースと仮想流出点であるシンクを設定し、一流入一流出のネットワークに変形する。ソースと各配水拠点およびシンクと需要節点を接続する

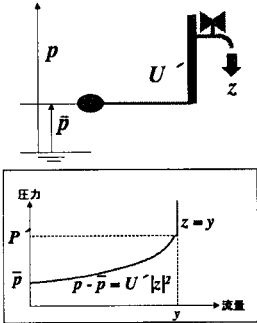


Fig.1 圧力と取り出し水量の関係

仮想管路を含め、すべての管路に費用関数は、図中に示したように設定した。

さらに、給水制限率を目標とした制御量計算のため、ソースとシンクを直結し、費用関数が0である仮想管路を追加する。この管路には、平時の総需要のうち制限されて給水されなかった分に相当する量の水が流れるとする。この仮想管路の目標流量を平時の総需要に給水制限率を乗じた水量として設定して以下の評価関数を導入する。

$$J = \sum_{i \in N} \gamma_i (p_i - p_i^*)^2 + \eta_0 (x_0 - x_0^*)^2 \rightarrow \min \dots \dots \dots (9)$$

$$x_0^* = \kappa \sum_{i \in N} y_i \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 $\eta_0$ は、重みパラメータ、 $\kappa$ は給水制限率である。ポンプ吐出圧  $p_i$  およびバルブ抵抗係数  $U_j$  を変化させる毎に最小費用流計算を施し、上記評価関数値が求まる。最適化演算により、この評価関数値を最小化するポンプ吐出圧やバルブ抵抗値が渇水時の適切な操作量と見なす。

4. シミュレーションと考察

対象とした管網は、配水拠点2、管路数924、節点数722、の規模である。Fig.3に、管網および配水拠点の位置を示す。総需要量は、2723m<sup>3</sup>/hrで、需要分布はこれに料金データを基に計算した振分比率を乗じることで求めている。この管網に対して、配水拠点A,Bからの送出圧力をそれぞれ1.0kg、1.6kgとしてシミュレーションを行った。通常これらの配水拠点では、用いた総需要量のケースではそれぞれ、2.4kg、3.3kg程度で運転されていて、全体の圧力分布は2kg前後に維持されているFig.4に、各節点の標高と需要低減率の関係をプロットしたものを示す。標高が高くなるにつれて低減率が大きくなり水の出が悪いことが示されている。また、同じ標高でも低減率にばらつきがあるのは、配水拠点に近いところでは圧力が高く、遠くなるに従って低くなっていくからである。これらは、いずれも定性的に言われている減圧給水時の状況をよく再現している。

続いて、給水制限率を目標とした配水制御方法の検証を示す。前章で述べた最適配水制御計算では、(9)式に示される評価関数において制御圧力

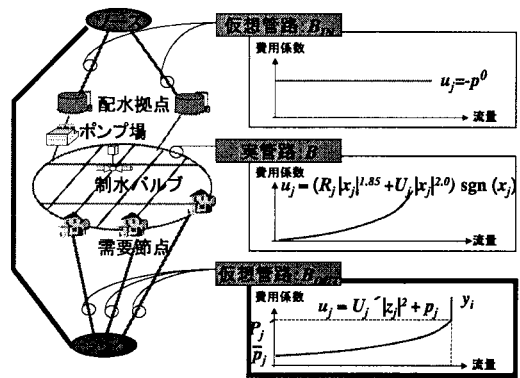


Fig.2 最小費用流問題への変換(渇水時)

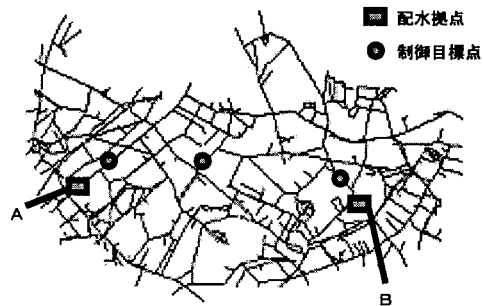


Fig.3 管網と配水拠点

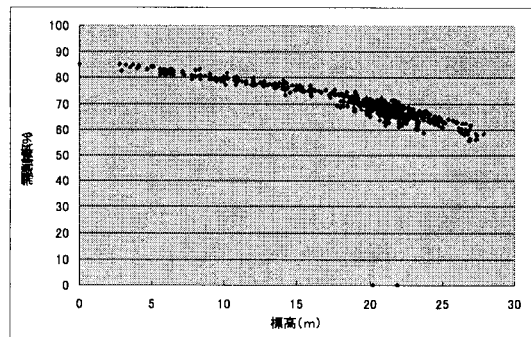


Fig.4 シミュレーション結果(標高と需要低減率)

目標値  $p_i^*$  を与える。ここでは、次のような考え方に従って目標値を設定した。まず、目標値を設定する節点は配水拠点直下の 2 地点のみとし、それ以外の節点については重みパラメータ  $\gamma_i$  を 0 とした。これは Fig. 3 の管網の場合、配水拠点からの送水圧力のバランスによってほぼ圧力分布が決まるからである。これらの目標値  $p_A^*$ 、 $p_B^*$  を給水制限率に応じてそれぞれ Table 1 のように設定した。この目標値が本来の望ましい値から大きく乖離している場合、最適計算の過程において評価関数の改善について感度が良い方の配水拠点の送水圧力が一方的に修正され、いびつな圧力分布となる。Table 1 の設定値は、数回の試行によりこの現象が出ないように決めた結果である。なお、重みパラメータ  $\gamma_i$  は 1.0、 $\eta_0$  は 10.0 とした。これらは (2) 式の圧力平衡式と単位系を勘案して決めたもので、ほぼ一律となる重みである。

Table 1 給水制限率と制御圧力目標値

給水制限率 (%)	圧力目標値	
	$p_A^*$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$p_B^*$ (m <sup>3</sup> /hr)
0	2.0	2.5
10	1.5	2.0
20	1.1	1.6
30	0.8	1.1

Table 2 給水制限率と制御結果

給水制限率 (%)	配水拠点 A		配水拠点 B		給水量 (m <sup>3</sup> )	需要低減率 (%)
	圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	流量 (m <sup>3</sup> /hr)	圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	流量 (m <sup>3</sup> /hr)		
10	1.89	1061	2.53	1377	2438	10.48
20	1.25	948	2.07	1210	2158	20.74
30	0.97	776	1.59	1117	1893	30.49

給水制限率を 10%、20%、30% とし、Table 1 の目標設定値を用いた配水制御計算によって得られた総配水量、および各配水拠点からの送出圧力、送出流量を Table 2 に示す。それぞれの目標制限率を満足させる送水圧力が求められている。圧力目標設定に試行錯誤の過程が残されるが、あらかじめ代表的な時間帯の総需要量に対してこの計算を行って、望ましい送水圧力を得ておけば、所望の節水効果を引き出すポンプ操作が可能になると考えられる。

## 5. むすび

管網解析に、節点と取り出し水量のモデルを取り入れることで、これを渇水時の減圧給水にも適用可能となるように拡張した。実用面から見て次のような意義があると考えている。一つには、状況や制御目的が異なる平時、渇水時を通じて一貫したモデルとなるように連続性を保証できる条件を明確にしたことである。さらに、給水制限率目標に対応した減圧レベルを得ることができるように定式化したことである。これは現場の要求に対して直接的な応えとなっており、渇水時の配水操作に対して十分有用なものと考えている。今後、フィールド検証等を通じ、実用化へ向けて努力していきたい。

## 参考文献

- (1) 高桑、配水管理のための管網解析プログラム、水道協会雑誌第 488 号、pp. 1~13 (1975)
- (2) 宮岡伸一郎、船橋誠壽、ネットワークフロー理論の応用による大規模配水システムの圧力最適化法、電学論 C102、pp. 59~66 (1982)
- (3) 西川泰浩、築山誠、上水道における大規模管網解析法、平 8 電気学会全大、No. 949 (1996)