

1. はじめに

配水管網設計の主要な目標としては、水量・水压の信頼性、水質の安全性、経済性、管路欠損時に対する応急性があげられる¹⁾。標題に掲げた配水能力示標は、水量・水压の信頼性に因する評価示標の一つであり、これによって需要水量変動に対して水量・水压が確保される割合と定量的に評価しうると考えられる²⁾。

既設管網にあっては、水压不足によって圧縮される需要水量が把握されねば適用しえないけれども、設計時点で問題となる需要水量予測最確値のまわりの誤差変動に対して有用であることは、文献²⁾に示したとおりである。ただしここでは、管路配置形態を樹枝状としていたので、本研究では網目状管網への適用について検討することにする。

設計目標を信頼性と経済性にしばったときには管路配置形態は樹枝状でなければならないのに対し、さらに応急性をも考慮するときには網目状とならざるをえない。応急性を考慮した設計法としては表-1にあげるような方法が考えられる。各方法の優劣についてはここで述べないが、本研究との関連から見れば、①～③法では配水能力示標の算出と不足したときの付加が必要となり、④法で

は所要の配水能力示標とするための確率管路流量の設定法が明らかにされねばならない。

2. 配水能力示標の定義

節点取り出し水量がいずれも変動係数 C の正規分布をなすと仮定するとき、配水能力示標 R は次式のごとく定義される。

$$R = -C \cdot Z \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 Z は水压最悪点における標準化したエネルギー位である。その値は正規分布表から読みとることができ、地盤上残存水頭が所要値以上となる確率(超過確率)に対応する。

$R=0$ のときは $Z=0$ 、したがってその節点において水压不足が生じる確率は50%であり、 R が大きくなるにつれて需要水量変動に対して水压不足の生じる確率は小さくなる。

3. 網目状管網における確率管路流量の設定

樹枝状管網と異なり、網目状管網では一つの節点の上流側に1本以上の管路が並列に接続している。これらの管路に所要の確率流量を設定するため、まず松田の方法あるいは管路流量のバラツキを最小とする方法によって流向および需要水量の予測最確値に対する基本流量、換言すれば配水能力示標 $R=0$ に対応する流量を割りつけ、つい

表-1 信頼性および応急性を考慮した経済的管径決定法の分類³⁾

応急性の 与りあげた	方 法	設計目標充足プロセス	本研究との関連
積極的	① 区画法による網目状管路流量配分にもとづく方法	応急性 → 経済性 (→ 信頼性)	配水能力示標の算出と付加
	② 応急性を制約条件化した経済的管径決定法	応急性・経済性 (→ 信頼性)	同 上
消極的	③ 樹枝状管網に連絡管を配置する方法	経済性 → 応急性 → 信頼性	同 上
	④ 松田式または管路流量のバラツキを最小とする網目状管路流量配分にもとづく方法	応急性 → 信頼性・経済性	確率管路流量の設定

で所要のRまで高めるに必要な流量増分を追加するという手順を繰り返すことにする。

網目状管網において、節点*i*と管路の接続状態は図-1に示すごとくである。ただし、 Q_{i-u} は上流側、 Q_{i+l} は下流側に接続する管路の流量である。 p_i は取り出し水量であり、予測最確値 $\bar{p}_i$ のまわりには分散 $C_0^2 \cdot \bar{p}_i^2$ をもって正規分布 $N(\bar{p}_i, C_0^2 \cdot \bar{p}_i^2)$ をなすと仮定する。

まず、末端点*i*=*n*、 $l_i=0$ について考える。この場合、*n*点に接続する上流側管路が輸送すべき総水量 $Q_{n,total}$ の分布は $N(\bar{p}_n, C_0^2 \cdot \bar{p}_n^2)$ である。これを u_n 本の管路で並列に輸送するのであるから、 $Q_{n,total}$ から u_n 個の標本を抽出したときの平均値に相当する水量が輸送されればよいはずである。平均値の分布は $N(\bar{p}_n, C_0^2 \cdot \bar{p}_n^2 / u_n)$ であり、これを基本流量比に比例させて配分すれば、上流側各管路の流量分布は

$$Q_{n-u} : N\left(\bar{p}_n \cdot \frac{\bar{Q}_{n-u}}{\sum \bar{Q}_{n-u}}, \frac{C_0^2 \cdot \bar{p}_n^2}{u_n} \cdot \left(\frac{\bar{Q}_{n-u}}{\sum \bar{Q}_{n-u}}\right)^2\right) \\ = N(\bar{Q}_{n-u}, C_0^2 \cdot \theta_{n-u}^2) \dots \dots \dots (2)$$

ここで平均に対する置換は、基本流量に因りて節点での流量の連続条件が満足されていることによ

る。分散に対する置換は単なる書きかえである。

末端点から出発（末端点が二つ以上あるときは並行して出発）し、節点取り出し水量およびすでに得られている下流側管路流量分布にもとづいて上流側管路流量分布を求めつつ配水基地に達するまで同様の手順を続けて行けばよい。一般節点*i*に接続する上流側管路(*i-u*)の流量分布は次式のごとくである。

$$Q_{i-u} : N\left((\bar{p}_i + \sum \bar{Q}_{i+l}) \cdot \frac{\bar{Q}_{i-u}}{\sum \bar{Q}_{i-u}}, \frac{C_0^2 \cdot \bar{p}_i^2 + C_0^2 \sum \theta_{i+l}^2}{u_i} \cdot \left(\frac{\bar{Q}_{i-u}}{\sum \bar{Q}_{i-u}}\right)^2\right) \\ = N(\bar{Q}_{i-u}, C_0^2 \cdot \theta_{i-u}^2) \dots \dots \dots (3)$$

なお、式(3)は末端点、配水基地に接続する管路でも、また樹枝状管網に対しても適用しうる。

以上の手順で管路流量分布が明らかとなるので、各管路流量が指定流量 Q_{i-u,r_0} を越えない確率を r_0 とするとき、 r_0 に対応する標準化管路流量 z_r は

$$z_r = (Q_{i-u,r_0} - \bar{Q}_{i-u}) / (C_0 \cdot \theta_{i-u}) \dots \dots \dots (4)$$

と書かれる。したがって

$$Q_{i-u,r_0} = \bar{Q}_{i-u} + C_0 \cdot z_r \cdot \theta_{i-u} \dots \dots \dots (5)$$

となる。これに対して直径を定めれば、配水基地から末端点にいたる管経路の損失水頭の非超過確率すなわち水压不足とならない確率は r_0 以上とな

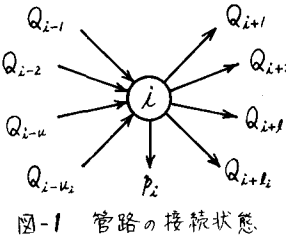


図-1 管路の接続状態

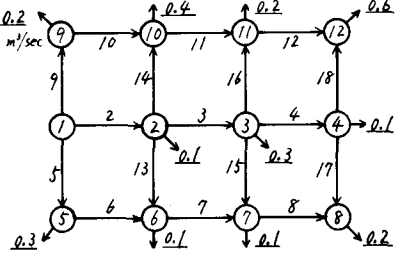


図-2 管網図(その1)

表-2 管路流量と直径

管路 番号	管 路 流 量 [m³/sec]					直 径 [mm]				
	流量の非超過確率: r_0					r_0				
	50%	60%	75%	90%	95%	50%	60%	75%	90%	95%
2	1.551	1.581	1.631	1.703	1.747	919	924	931	941	948
3	0.900	0.926	0.971	1.034	1.072	747	752	762	775	782
4	0.300	0.311	0.330	0.358	0.374	507	512	520	532	538
5	0.433	0.456	0.494	0.549	0.583	517	524	537	554	563
6	0.133	0.136	0.142	0.149	0.154	375	378	383	390	393
7	0.167	0.172	0.181	0.193	0.201	423	427	433	441	446
8	0.150	0.158	0.171	0.191	0.202	428	434	444	457	464
9	0.616	0.635	0.667	0.713	0.741	615	620	628	640	647
10	0.416	0.428	0.447	0.475	0.492	553	557	564	574	579
11	0.433	0.446	0.469	0.501	0.520	604	609	617	628	635
12	0.450	0.474	0.514	0.572	0.607	638	647	662	680	691
13	0.134	0.137	0.143	0.151	0.155	339	340	343	347	350
14	0.417	0.429	0.448	0.477	0.493	527	530	536	545	549
15	0.083	0.086	0.090	0.096	0.100	297	299	303	308	311
16	0.217	0.224	0.235	0.251	0.261	431	435	440	448	452
17	0.050	0.053	0.057	0.064	0.067	263	266	273	281	285
18	0.150	0.158	0.171	0.191	0.203	399	405	414	426	433

るはずである。

設計時点では、所要の R となるように管径決定する必要があり、そのためには管径決定の前段階で用いられる式(5)中の C_0 , z_r と式(1)の R との関係が明らかにされねばならない。計算例によって、この関係を調べてみることにする。

〔計算例〕 図-2の管網に対し、松田式流量配分法^{(4),(1)}によって基本流量を設定した場合について検討する。計算条件は

$$\text{総費用式: } W = P_A \cdot H_p + \sum_j (\alpha \cdot D_j^\beta + \gamma) \cdot L_j \quad (6)$$

において、 H_p = 揚程(m), D_j = 管径(m), L_j =

管路長ですべて 1,000 m, $P_A = 2.54 \times 10^6$ (円/m),

$\alpha = 8 \times 10^4$, $\beta = 2$, $\gamma = 1.2 \times 10^4$.

流速係数: すべて 100.

節点取り出し水量の最確値 $\bar{p}_i$: 図-2のとおり。

地盤高: 平坦とし、すべての節点で 0 m.

配水ポンプ: 節点 1 にあり、ポンプ井水位は 0 m.

水压計算のためのシミュレーション回数: 各 500 回。

予測誤差の変動係数: $C_0 = 0.3$.

管路流量の非超過確率: $r_0 = 50, 60, 75, 90, 95\%$ とし、式(5)による管路流量およびこれをを用いた経済的管径は表-2のごとくである。

上に得られた C とおりの管径に対し、 $C = 0.1 \sim 0.5$ の水量変動を与えたモンテカルロ・シミュレーションによって、末端点 8 と 12 におけるエネルギー位を求め、その所要値以上となる確率 r および r に対応する標準化エネルギー位 z をプロットすると図-3のごとくである。

図中の曲線は、管路流量を設定したときの z_r と C_0 を用いて $0.3 \cdot z_r = R_0$ とおき、これを式(1)に代入したときの $-C \cdot z = 0.3 \cdot z_r$ を表わす。図より、 $R_0 = R$ とみなしうる。したがって、流量設定段階で、式(5)における $C_0 \cdot z_r$ を式(1)の R と等しいとおいて

$$Q_{i-n, r_0} = \bar{Q}_{i-n} + R \cdot \theta_{i-n} \quad (7)$$

とし、これに対して管径決定すれば、所要の R を

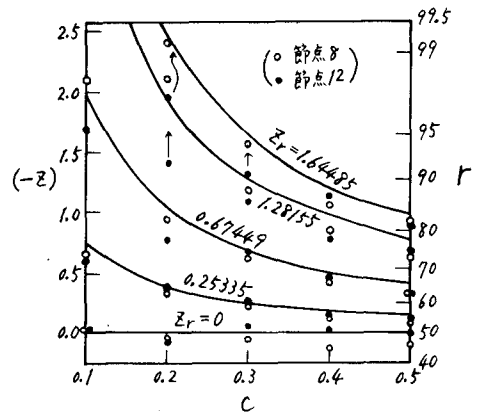


図-3 計算結果の z vs. C

もつ管網が設計されることになる。

以上の流量設定においては、確率の加算、管路流量変動の独立性、閉管路における損失水頭の閉合条件などに関して問題があるにもかかわらず、結果的には設定した R と計算結果の R とがほぼ一致しており、実用上は差しつかえないと考える。

4. 配水能力示標の算出法

式(1)の R を求めるには、取り出し水量の変動係数 C を与え、節点エネルギー位の超過回数の相対度数を超過確率とし、これを z に変換して代入すればよい。しかしながら、相対度数から確率値を求めるには、きわめて多数回の管網流量計算を必要とし、計算時間上の困難さともなる。ここでは、取り出し水量増分とエネルギー位低下の両には比例性ならびに加法性が成立すること⁽⁵⁾を利用して、標本抽出の考えによって簡単に R が算出できることを明らかにする。

すべての節点取り出し水量が予測最確値 $\bar{p}_i$ に等しいとき、注目する節点 n のエネルギー位を $\bar{E}_n$ とする。 i 点の取り出し水量が $\bar{p}_i + \Delta p_i$ に変化したとき、エネルギー位が $\bar{E}_n + \Delta E_{n,i}$ になったとすれば、 Δp_i と $\Delta E_{n,i}$ の関係は、比例性の仮定により

$$\Delta E_{n,i} = E_{n,i} - \bar{E}_n \cong (\partial E_n / \partial p_i) \cdot \Delta p_i \quad (8)$$

と書かれる。ここで Δp_i は $N(0, c^2 \bar{p}_i^2)$ をなすから、 $\Delta E_{n,i}$ の分布は $N(0, c^2 (\partial E_n / \partial p_i)^2 \bar{p}_i^2)$ となる。

いずれの節点においても水量変動があるときのエネルギー位低下量 ΔE_n は、加法性の仮定により

$$\Delta E_n \cong \sum_i \Delta E_{n,i} \dots\dots\dots (9)$$

となる。 ΔE_n の分布は正規分布の再生性の定理によって $N(0, c^2 \sum_i (\partial E_n / \partial p_i)^2 \cdot \bar{p}_i^2)$ となり、したがってエネルギー位 E_n の分布は $N(\bar{E}_n, c^2 \sum_i (\partial E_n / \partial p_i)^2 \cdot \bar{p}_i^2)$ と書かれる。

標準化エネルギー位 z' は

$$z' = \frac{E_n - \bar{E}_n}{c \sqrt{\sum_i (\partial E_n / \partial p_i)^2 \cdot \bar{p}_i^2}} \dots\dots\dots (10)$$

となり、 E_n として各点の所要残存水頭 $\hat{E}_n$ を代入したときの z' を z とおけば、 R は次式から得られる。

$$R = -c \cdot z = \frac{\bar{E}_n - \hat{E}_n}{\sqrt{\sum_i (\partial E_n / \partial p_i)^2 \cdot \bar{p}_i^2}} \dots\dots (11)$$

〔計算例〕 図-4 (A), (B) の管網について、式(11)の成立を検討する。計算条件はつぎのとおり。

節点取り出し水量の最確値： $\bar{p}_2 \sim \bar{p}_{12} = 0.1 \text{ m}^3/\text{sec}$ 。

管径：図-4 (A), (B) に示すとおり。

配水基地のエネルギー位： $E_1 = 35.52 \text{ m}$ 。

$\partial E_n / \partial p_i$ ： $0.3 \cdot \bar{p}_i$ と $(-0.3) \cdot \bar{p}_i$ に対する平均値。

流速係数、管路長、地盤高、所要水頭：前例と同じ。

$C = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ の5とおりの水量変動を与え、式(11)によって算出した R は図-5に示す直線のごとくである。図中の点は相対度数法(シミュレーション回数は各500回)によってものであり、式(11)が成立するとみなしてよいだろう。

5. 配水能力の付加

付加すべき配水能力示標の値を ΔR とするときつぎのような方法が考えられる。

(1) 確率管路流量の設定—— $R \cong 0$ のときは、その状態における管路流量を基本流量とし、式(7)の R に $R + \Delta R$ を代入して管径を決定する。

(2) 管径の一定比率増加——式(11)の関係を利用すると、必要な管径増加比 D/D_0 は

$$D/D_0 = \left\{ 1 + \Delta R \cdot \sqrt{\sum_i (\partial E_n / \partial p_i)^2 \cdot \bar{p}_i^2} / (E_1 - \hat{E}_n) \right\}^{1/2.57} \quad (12)$$

ただし、右辺の ΔR 以外は付加前の値を使用する。

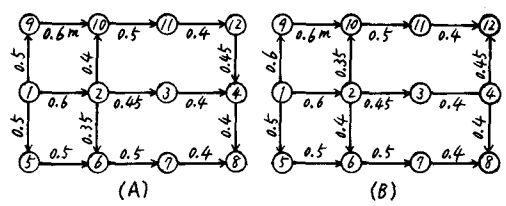


図-4 管網図(その2)

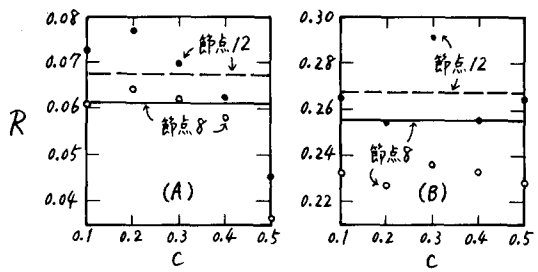


図-5 計算結果の R vs. C

(3) 揚程増加——式(11)より、必要な増加量は

$$\Delta H_p = \Delta R \cdot \sqrt{\sum_i (\partial E_n / \partial p_i)^2 \cdot \bar{p}_i^2} \dots\dots\dots (13)$$

(4) 管径の局部的増加——各管径増分に対する R の増分を式(11)より求め、 ΔR とするのに効果的な管径増加をおこなう。

以上のうち、(1)は他の設計目標の制約が弱いとき、(2)と(3)は強いときに用いるべきであり、また最終的に規格管径にまるめるときは(3)と(4)を併用すべきであろう。

6. あとがき

一般的な管路配置状態について、所要の配水能力をもつ管網を設計するための確率管路流量設定法および管網流量計算が少数回で済む配水能力示標 R の算出法と付加法を明らかにした。

これら以外に、①所要 R 値の決定、②既設管網への適用など重要な向題が残されているが、今後の課題としたい。

なお、計算には北海道大学大型計算機センターの FACOM 230-60 を利用した。

参考文献

- 1) 高桑：水協誌，第443号(1971.8)
- 2) 高桑：水協誌，第451号(1972.4)
- 3) 高桑：水協誌，投稿中。
- 4) 松田：水協誌，第329号(1962.2)
- 5) 高桑：第6回衛生工学研究討論会講演論文集(1970.1)