

配水コントロールに関する二、三の基礎的計算

北海道大学工学部 高 桑 哲 男

1. は じ め に

配水管網内の需要は、節点における取出し水量と圧力によって代表される。節点取出し水量の変動に対処して、各節点圧力を許容範囲内に保持することを主たる目的とした狭義の配水コントロール¹⁾のためにはまず、管網ブロックへの流入水量および主要な節点における水圧を予測することが不可欠である。前者の予測は実測データの収集とその統計的分析によってなされようが、後者においては、それに加えて水理計算の果たす役割が大となろう。

配水コントロール（以下、狭義の配水コントロールを指す。）においては、節点における流量連続条件および閉管路における損失水頭の閉合条件という水理学的条件のみによって管網内の流量および圧力状態を把握することは不可能である。その理由は、主として①節点取出し水量が未知なることであり、さらに②漏水があれば流量連続条件は不成立となり、③計算の便宜上行なわれる管路省略によって、実際管網における水理状況とは相違することになり、④摩擦以外の諸損失は無視されていること、⑤流速係数あるいは流速公式の信頼性に不安が残る²⁾、など多くの問題点が含まれているからである。したがって、管網の水理学的挙動の予測精度を高めるためには、水理計算と統計計算の結果を照らし合わせる必要があるであろう。

配水コントロールのための水理計算を配水管網の計画・設計、運転段階に関連づけて考えてみると、④第1段階の計算は管網の計画時点になされるものであって、配水コントロール上有利な流入方式を選定し、ポンプ容量を決定する。この計算は又つ以上の配水池から流入する多点注入系において必要となる。⑤第2段階の計算は、単点注入系、多点注入系のいかんによらず、計画量にもとづいて設計された管網を実際に運転したときに生ずる誤差を修正することを主たる目的とし、漏水防止あるいは給水制限のための水理学的方策決定を付随する。そのための主要な手段としては、増・減圧量の設定および管径変更がある。以上④、⑤の計算の基本となる水量はそれぞれ各節点における時間最大給水量、各時間給水量の推定値である。⑥管網内の場所的および確率的水量変動と上記の問題点①～⑤のために、管網運転時の増・減圧量は統計計算にもとづいて決定されるべきであろう。この段階における水理計算は、その統計的分析の構造模型および予測式の関数形を決定する上で役だつものであり、節点取出し水量の変動あるいは増・減圧量の変化と各節点の圧力変化との関係を明らかにしようとするものである。またこの計算は、地域的水量変動を対象とするときには、水圧計設置位置およびその個数を決定する上でも有効となろう。

上記④～⑥の計算のうち、④に³⁾関しては文献に二、三の計算例を示してある。本研究においては、④に関連して多点注入系における流入方式の検討を行なった。また⑥に⁴⁾関係するものとして、節点取出し水量の変動および増・減圧量の変化にともなう管網内圧力の挙動を調べた。計算には節点エネルギー位を未知数とした計算法を用い、作成された連立1次方程式は還元解法によって解いた。計算プログラムは文献⁴⁾に掲げたものを各問題に応じて適宜修正して利用した。

2. 多点注入系の計算

2-1 多点注入系における基本的関係

配水コントロールは2つ以上の配水池を運用する場合、すなわち多点注入系の場合に一層重要性を増すとともに問題も複雑となる。配水池から管網への流入形態および配水池水位関係によって、多点注入系は種々の形式に分類されようが、配水コントロールの立場からいえば、その種々の形式の中で管網内の水理状態を把握し、それに対処する上で効果的な形式を採択することが望まれる。

配水池から管網へ流入する管路内の流量を所定の比率に配分するかあるいは自由にするかによって多点注入系は大きく2つの場合に分けられよう。流入量を所定の比率に配分する場合を配分流入方式、自由に流入させる場合を自由流入方式と呼ぶことにする。一方、1つ以上の配水池水位を一定とするか、水位差を一定とするか、あるいはすべての水位を可変とするかによって3つの場合に分けることもできよう。それぞれを水位一定方式、水位差一定方式、水位可変方式と呼んで分類しよう。この分類はあくまでも計算上の便宜を図ったものであって、配水池水位の変動幅はその有効水深を越えることができないから、それを越える場合には増・減圧によって指定された水位を保持しなければならない。なお自由流入方式においては、流量調整は配水池間連絡管路によってなされることになるから、そのための圧力制御が必要となる。

節点数 n 、配水池数 m から成る m 点注入の管網について考えよう。①自由流入方式においては、水位一定方式の場合、成立すべき式は各節点における流量連続条件式であって、その数は n 本である。水位を一定に保つ配水池の数を k ($1 \leq k \leq m$) とすると、管網内各節点エネルギー位と $(n-k)$ 個の配水池水位が未知数であって、その数は合計 $(n+m-k)$ 個となる。水位差一定方式の場合、 m 配水池間の水位差が一定であるという関係式が $(m-1)$ 本成立するから、流量連続条件式と合わせて式数は $(n+m-1)$ 本となる。未知数は各節点エネルギー位と各配水池水位であって、合計すると $(n+m)$ 個である。水位可変方式の場合、式は n 本、未知数は $(n+m)$ 個となる。これは水位一定方式の特別の場合、すなわち $k=0$ の場合に相当する。②配分流入方式においては、3つの方式のいずれについても未知数は自由流入方式の場合と同数であるが、条件式は流量配分比の関係式の数すなわち $(m-1)$ 本だけ増加する。以上の諸方式のほか、水位差一定方式、水位可変方式と水位一定方式、あるいは自由流入方式と配分流入方式の混合方式も考えられるが、それについての論議は省略する。

以上に述べた関係をまとめると表-1のごとくになる。同表には、以下の論議を具体化するために $m=2$ ($k=1, 2$)、 $m=3$ ($k=1 \sim 3$) なる2点注入系と3点注入系における関係も合わせて示してある。(3)らんには(条件式の本数-未知数の個数)が記入されている。その値が正であれば、すなわち条件式の本数が未知数の個数よりも多いときには、その分だけ増・減圧制御を行なわねばならない。その理由は、新たな1つの節点に増圧ポンプまたは減圧弁を設置することによって条件式が1本増加する反面、未知数は節点エネルギー位1個と揚程または減圧値が1個の合計2個増加し、差引きすると未知数の方が1個だけ余計に増加するからである。一方、未知数の個数が条件式の本数よりも多いときには、その分だけ節点エネルギー位を指定することによって未知数を既知数に変更しなければならない。

表-1 多点注入系における条件式と未知数の数

注入系	方式	自由流入方式				配分流入方式			
		(1) 条件式	(2) 未知数	(3) (1)-(2)	(4) 指定値の数	(1) 条件式	(2) 未知数	(3) (1)-(2)	(4) 指定値の数
n点注入系	水位一定方式	n	$n+m-n$	$n-m$	$n+(m-n)$	$n+m-1$	$n+m-n$	$n-1$	$n+(1-n)$
	水位差一定方式	$n+m-1$	$n+m$	-1	$m+1$	$n+2m-2$	$n+m$	$m-2$	$m+(2-m)$
	水位可変方式	n	$n+m$	$-m$	$0+m$	$n+m-1$	$n+m$	-1	$0+1$
2点注入系	2水位一定方式	n	n	0	$2+0$	$n-1$	$n-2$	1	$2+(-1)$
	1水位一定方式	n	$n+1$	-1	$1+1$	n	n	0	$1+0$
	水位差一定方式	$n+1$	$n+2$	-1	$2+1$	$n+2$	$n+2$	0	$2+0$
	水位可変方式	n	$n+2$	-2	$0+2$	$n+1$	$n+2$	-1	$0+1$
3点注入系	3水位一定方式	n	n	0	$3+0$	$n-1$	$n-3$	2	$3+(-2)$
	2水位一定方式	n	$n+1$	-1	$2+1$	n	$n-1$	1	$2+(-1)$
	1水位一定方式	n	$n+2$	-2	$1+2$	$n+1$	$n+1$	0	$1+0$
	水位差一定方式	$n+2$	$n+3$	-1	$3+1$	$n+4$	$n+3$	1	$3+(-1)$
	水位可変方式	n	$n+3$	-3	$0+3$	$n+2$	$n+3$	-1	$0+1$

以上の諸方式について注意すべきこととして、配分流入方式においては2つ以上の配水池水位を一定とする方式および水位差一定方式は成立しえないことがあげられる。その理由は、前着においては、既存または新設の1つ以上の節点において圧力制御を行なわねばならず、もし配水ポンプをその節点に設置するならば1水位一定方式の場合に一致してしまうからである。また後着においては、すべての配水池水位および節点エネルギー位が指定されておらず、いわば基準面をもたないからである。この2つの場合については、次節における論議の対象から除外することにする。

2-2 配水コントロール上から見た諸方式の検討

配水コントロールにおいては、需要水量の変動にともなう各節点エネルギー位の推定が基礎となる。そのためには、前節で示した諸方式のうちで多点注入系における節点の圧力変化の挙動を明らかにする上で有効な方式はどれであるかを見いだす必要がある。

需要水量変動の影響を考える場合、まず節点取出し水量が一様な比率で変動する場合を想定して出発すべきであろう。前段階として単点注入系について調べてみよう。

図-1の管網(管路長と流速係数はそれぞれすべて500m, 100とした。)における節点エネルギー位および管内流量と損失水頭はそれぞれ表-2, 3のごとくであり、同表には節点取出し水量が一様に0.4倍に変化したときの結果も合わせて示してある。ただし、いずれの場合も配水池水位は50mに固定して計算した。表-3から明らかなように、各管内流量は0.4倍、損失水頭については $0.4^{1.85} = 0.1836$ 倍になっている。また基準流量時、1倍流量時の節点エネルギー位および基準エネルギー位(いまの場合は配水池水位)をそれぞれ HL_1 , HL_2 および BL_1 , BL_2 とすれば、節点

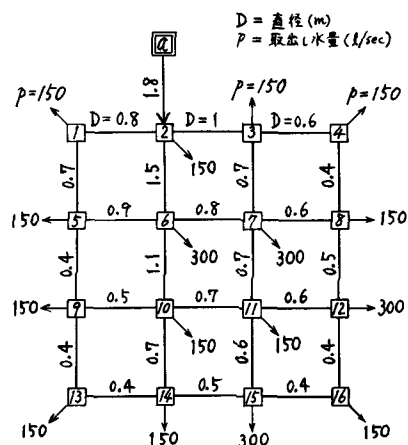


図-1 管網図(単点注入系)

エネルギー位について

$$HL_L = BL_L - (BL_1 - HL_1) \times L^{1.85} \dots \dots \dots (1)$$

なる関係が満足される。たとえば節点16については

$$50 - (50 - 46.007) \times 0.1836 = 50 - 0.733 = 49.267 \text{ m}$$

となっている。このように節点取出し水量が一様にたとえ1倍となれば、損失水頭は一様に $L^{1.85}$ 倍となり、節点エネルギー位は式(1)によって表わされるという特性は、管網内圧力状態を知る上できわめて有効である。この特性は、単点注入系においては配水池水位または節点エネルギー位に関する指定値が1個であることに由来している。したがって多点注入系においても、どのような条件が満足されるならば同じ特性をもつことが類推される。

表-1の(4)らには、各方式において指定される配水池水位(第1項)と節点エネルギー位(第2項)の個数が記入されている。この値が合計1となるのは、配分流入方式における1水位一定方式と水位可変方式である。これらの方式が上記の特性を有することを確認するために、図-2に示す3点注入の管網(管路長と流達係数はそれぞれすべて500m, 100とした。)について、基準流量時とその2.25倍流量時に対して行なった計算結果の一部を表-4, 5に示す。ただし、1水位一定方式におい

ては配水池Cの水位を50mに、水位可変方式では節点12のエネルギー位を49.6mに指定した。また管路a-9, b-1, c-3の流量を1:2.5:1.5と配分した。この二つの場合には、管内流量と損失水頭は同一値となり、節点エネルギー位については平行移動の関係が成立する。換言すれば、節点エネルギー位と配水池水位のうち、いずれの1個を指定してもエネルギー位の相対的關係には影響を及ぼさない。自由流入方式においては、一見すると指定値が1個となる場合は存在しないようであるが、表-1の(4)らの第1項か第2項のいずれかが0であるときは例外であって、特別の場合すなわちm個の配水池水位に同一値を指定したm水位一定方式とm個の節点エネルギー位に同一値を指定した水位可変方式は上記の特性を有する。図-2の管網について行なった計算結果の一部を表-6, 7に示す。ただし、3水位一定方式においては3配水池の水位を50mに、水位可変方式においては、節点4, 7, 10のエネルギー位を49.8mに指定した。この二つの場合には、節点エネルギー位についての平行移動の関係は成立しない。

表-2

節点エネルギー位(m)
〔単点注入系〕

節点	基準流量	0.4倍流量
(a)	50.000	50.000
1	49.212	49.855
2	49.536	49.915
3	48.999	49.816
4	48.220	49.674
5	49.045	49.825
6	49.073	49.830
7	48.261	49.681
8	47.527	49.547
9	47.743	49.586
10	48.444	49.715
11	47.652	49.570
12	46.758	49.406
13	46.889	49.430
14	47.551	49.551
15	46.766	49.407
16	46.006	49.268

表-3 管内流量(l/sec)と損失水頭(m)
〔単点注入系〕

管路	基準流量		0.4倍流量	
	流量	損失水頭	流量	損失水頭
a-2	3000.0	0.464	1200.0	0.085
1-2	-294.2	-0.325	-117.9	-0.059
1-5	144.2	0.166	57.7	0.030
2-3	694.3	0.537	277.7	0.098
2-6	1861.5	0.463	744.6	0.085
3-4	221.6	0.780	88.6	0.143
3-7	322.7	0.738	129.1	0.135
4-8	71.6	0.693	28.6	0.127
5-6	-106.4	-0.028	-42.6	-0.005
5-9	100.6	1.302	40.3	0.239
6-7	482.8	0.812	193.1	0.149
6-10	972.3	0.630	388.9	0.115
7-8	214.6	0.734	85.8	0.135
7-11	290.9	0.609	116.4	0.112
8-12	136.2	0.769	54.5	0.141
9-10	-129.5	-0.701	-51.8	-0.128
9-13	80.1	0.854	32.1	0.157
10-11	335.2	0.792	134.1	0.145
10-14	357.6	0.893	143.0	0.164
11-12	238.6	0.894	95.4	0.164
11-15	237.5	0.886	95.0	0.162
12-16	74.8	0.751	27.9	0.138
13-14	-69.9	-0.662	-27.9	-0.121
14-15	137.7	0.785	55.1	0.144
15-16	75.2	0.759	30.1	0.139

表-4 節点エネルギー位 (m) (3点注入・配分流入方式)

節点	1 水位一定方式		水位可変方式	
	基準流量	2.25倍流量	基準流量	2.25倍流量
(a)	49.705	48.674	50.560	53.910
(b)	50.594	52.667	51.449	57.902
(c)	50.000	50.000	50.855	55.236
1	50.290	51.300	51.145	56.536
2	49.745	48.855	50.600	54.090
3	49.750	48.876	50.605	54.112
4	49.367	47.159	50.222	52.395
7	49.232	46.552	50.087	51.788
10	49.152	46.193	50.007	51.428
11	48.934	45.213	49.789	50.449
12	48.745	44.364	49.600	49.600

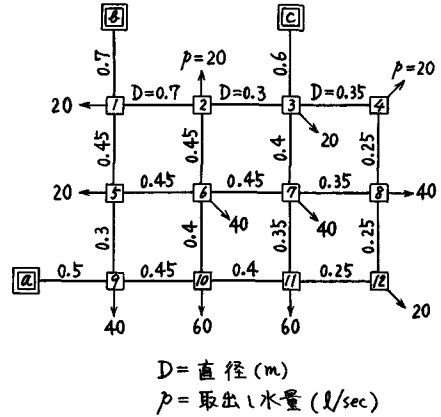


図-2 管網図 (3点注入系)

表-5 管内流量 (l/sec) と損失水頭 (m)

〔3点注入・配分流入方式における〕
〔1水位一定方式と水位可変方式〕

管路	基準流量		2.25倍流量	
	流量	損失水頭	流量	損失水頭
a-9	80.0	0.287	180.0	1.289
b-1	200.0	0.304	450.0	1.366
c-3	120.0	0.250	270.0	1.124
1-2	85.7	0.545	192.8	2.446
3-4	36.6	0.382	82.2	1.714
5-6	56.2	0.249	126.4	1.118
7-8	33.1	0.319	74.6	1.432
7-11	32.0	0.298	71.9	1.339
8-12	9.7	0.168	21.8	0.756

表-6 節点エネルギー位 (m) (3点注入・自由流入方式)

節点	3 水位一定方式 (3 水位同一値指定)		水位可変方式 (3 節点エネルギー位同一値指定)	
	基準流量	2.25倍流量	基準流量	2.25倍流量
(a)	50.000	50.000	50.380	52.402
(b)	50.000	50.000	51.657	58.139
(c)	50.000	50.000	50.265	51.888
1	49.818	49.185	51.240	56.267
2	49.513	47.813	50.401	52.497
3	49.682	48.572	50.139	51.320
4	49.291	46.817	49.800	49.800
7	49.121	46.053	49.800	49.800
10	49.096	45.942	49.800	49.800
11	48.854	44.857	49.544	48.649
12	48.655	43.964	49.319	47.642

3. 節点取出し水量の場所的変動および増・減圧制御にともなう管網内圧力変化

3-1 節点取出し水量の変動による圧力変化

各節点の取出し水量が一様に変動するときには、前章で述べたごとく、管網内の圧力変化状況を把握することが可能である。しかしながら、たとえば住宅地域内にある工場のごとく需要水量の時間的変動パターンが異なる節点が含まれる場合には、その局所的流量変化によってひき起こされた水理学的乱れを修正すべく管網内全部の流量およびエネルギー位が変化するから問題が複雑となる。また変動パターンが同じであっても確率の変動は常に存在するから、同様な問題が生ずる。管網運転時の局所的変動に対しては、その変動と圧力変化を直接に水理学的関係によって結びつけることは不可能であって、データの積重ねとその解析に頼らざるをえない。ここでは、その場合の統計的分析における構造模型の作成あるいは分析の結果求めらるべき予測式の関数形を決定するための基礎となるよう

表-7 流量(l/sec)と損失水頭(m)(3点注入・自由流入方式)

管 路	3 水位一定方式 (3 水位同一値指定)				水 位 可 変 方 式 (3 節点エネルギー位同一値指定)			
	基準流量		2.25倍流量		基準流量		2.25倍流量	
	流 量	損失水頭	流 量	損失水頭	流 量	損失水頭	流 量	損失水頭
a-9	112.1	0.536	252.2	2.407	79.9	0.287	179.9	1.287
b-1	151.4	0.182	340.6	0.815	237.1	0.417	533.4	1.872
c-3	136.5	0.318	307.2	1.428	83.0	0.126	186.7	0.568
1-2	62.7	0.305	141.1	1.371	108.2	0.840	243.6	3.770
3-4	37.0	0.391	83.2	1.755	34.2	0.339	77.0	1.520
5-6	51.4	0.212	115.7	0.951	67.5	0.350	151.9	1.572
7-8	32.4	0.306	72.9	1.374	34.5	0.343	77.5	1.540
7-11	30.1	0.266	67.7	1.196	29.5	0.256	66.3	1.151
8-12	9.4	0.159	21.1	0.715	8.7	0.138	19.6	0.618

に、水理計算例によって局所的水量変動と管網内圧力変化の関係を調べることにする。

以下の記述において

$$A(\ell; p_\ell | \ell; p_\ell | \dots | n; p_n)$$

なる記号を用いることにする。ここで、 $\ell, \ell, \dots, n$ は節点番号、 $p_\ell, p_\ell, \dots, p_n$ はその節点における取出し水量であり、そのときの管路($i-j$)内の流量、損失水頭および節点 ℓ のエネルギー位はそれぞれ $A = Q_{ij}$, H_{ij} および E_ℓ と置くことによって得られるものとする。たとえば、節点3, 5における取出し水量がそれぞれ200, 300 l/secであり、それ以外の節点取出し水量の変化を考えないときの管路(3-4)内の流量は次のごとく表現される。

$$Q_{34}(3; 200 | 5; 300)$$

節点取出し水量の変動と管内流量変化との間には密接な関係のあることが予想される。図-1の管網において、節点6の取出し水量のみを300から500, 600, 800 l/secと変化させて

$$\frac{Q_{ij}(6; 600) - Q_{ij}(6; 300)}{Q_{ij}(6; 500) - Q_{ij}(6; 300)}, \quad \frac{Q_{ij}(6; 800) - Q_{ij}(6; 300)}{Q_{ij}(6; 500) - Q_{ij}(6; 300)}$$

なる増分比を求めると表-8のごとくである。前者は $(600-300)/(500-300) = 1.5$ 、後者は $(800-300)/(500-300) = 2.5$ なる値に近い値をとっており、このことは微小変化における比例性が成立していることを示している。ただし、増分比が大きくなるにつれて比例性は悪化してくる。上記の比例性によって、節点 ℓ の取出し水量が p_ℓ から $p_\ell + \Delta p_\ell$ に変動したときの管内流量は次式によって近似される。

$$Q_{ij}(\ell; p_\ell + \Delta p_\ell) = Q_{ij}(\ell; p_\ell) + (\Delta p_\ell / \beta) \{Q_{ij}(\ell; p_\ell + \beta) - Q_{ij}(\ell; p_\ell)\} \dots (2)$$

ただし、 β は取出し水量の基準増分量である。

式(2)を利用すると、損失水頭の変化は次のようにして求められる。すなわち、管路抵抗係数を

表-8 取出し水量変動による管内流量と損失水頭の変化

管 路	増分比; 1.5		増分比; 2.5	
	流 量	損失水頭	流 量	損失水頭
a-2	1.500	1.521	2.500	2.602
1-2	1.513	1.525	2.528	2.621
1-5	1.513	1.543	2.529	2.712
2-3	1.548	1.527	2.604	2.633
2-6	1.495	1.526	2.490	2.628
3-4	1.558	1.528	2.623	2.637
3-7	1.546	1.531	2.602	2.654
4-8	1.558	1.532	2.623	2.662
5-6	1.515	1.449	2.535	2.239
5-9	0.972	1.363	1.790	1.792
6-7	1.551	1.517	2.611	2.581
6-10	1.527	1.511	2.565	2.557
7-8	1.570	1.527	2.649	2.639
7-11	1.536	1.520	2.584	2.597
8-12	1.549	1.524	2.608	2.616
9-10	1.241	1.421	2.098	2.105
9-13	1.750	1.625	3.030	3.078
10-11	1.539	1.517	2.590	2.577
10-14	1.524	1.511	2.556	2.555
11-12	1.549	1.522	2.608	2.606
11-15	1.536	1.520	2.584	2.587
12-16	1.547	1.523	2.598	2.604
13-14	1.750	1.614	3.030	3.088
14-15	1.537	1.516	2.584	2.579
15-16	1.547	1.518	2.598	2.587

$$H_{ij}(k; p_k + \beta) = K_{ij} Q_{ij}^{1.85}(k; p_k + \beta)$$

なる関係式の右辺を Taylor 展開して 2 次以上の微小項を無視することにより，節点 n の取出し水量が $\beta_n + \beta$ なるときの損失水頭は

$$H_{ij}(\ell; p_k + \beta) = H_{ij}(\ell; p_k) + 1.85 K_{ij} Q_{ij}^{0.85}(\ell; p_k) \{Q_{ij}(\ell; p_k + \beta) - Q_{ij}(\ell; p_k)\}$$

と表わされる。一方、 $p_k + \Delta p_k$ なるときの損失水頭は、式-(2)を用いることにより、同様にして

$$H_{ij}(k; p_k + \Delta p_k) = H_{ij}(k; p_k) + 1.85 K_{ij} Q_{ij}^{0.85}(k; p_k) \{Q_{ij}(k; p_k + \Delta p_k) - Q_{ij}(k; p_k)\}$$

となるから、損失水頭の増分比についても

$$\frac{H_{ij}(k; p_k + \Delta p_k) - H_{ij}(k; p_k)}{H_{ij}(k; p_k + \beta) - H_{ij}(k; p_k)} \approx \frac{\Delta p_k}{\beta} \dots \dots \dots (3)$$

なる関係が成立する。 $h=6$, $p_h=300$, $\beta=200$ l/sec について、 $\Delta p_h=300$, 500 l/sec としたときの結果を表-8に示してある。表から明らかなように、取出し水量変動と損失水頭変化との間にも比例性が見られ、その変化を増分比で表わしたときの比例定数は1となる。この例においては、管路(5-9), (9-13)および(13-14)についての比例性があった。示すように、その損失水頭の変化が小さいので管網内の圧力状態場合に及ぼす影響は小である。損失水頭の変化を

$$X_{ij} = H_{ij}(6; 600) - H_{ij}(6; 300)$$

と表わすと、その絶対値の最大値は管路(5-6)において生じ

$$|X_{56}| = |0.81215 - 0.77482| = 0.03733 \text{ m}$$

である。 $X_{ij}/|X_{56}|$ なる比は図-3に見られるような分布をしている。

管路の損失水頭変化が節点取出し水量の変化に比例することから、当然節点エネルギー位変化との間にも比例関係が成立するはずであって、その関係は次のように書かれよう。

$$E_i(k; p_k + \Delta p_k) = E_i(k; p_k) + (\Delta p_k / \beta) \{ E_i(k; p_k + \beta) - E_i(k; p_k) \} \dots (4)$$

式-(4)において、 $l_e = 6$ 、 $p_e = 300$ 、 $\beta = 300$ l/sec なるとき $\Delta p_e = 600$ l/sec とした2倍外挿によって推定した各節点エネルギー位と実際の計算によって求めた値を比較すると表-9のごとくであって、非常によい一致を示している。

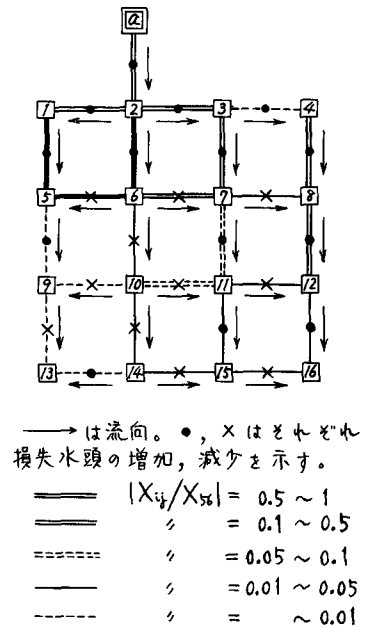


図-3 損失水頭変化比の分布

表-9

節点取出し水量変化に
対する比例性を用いた
節点エネルギー位(m)の推定

節点	推定値	計算値
1	48.923	48.911
2	49.357	49.350
3	48.771	48.761
4	47.941	47.950
5	48.698	48.616
6	48.644	48.624
7	47.906	47.889
8	47.185	47.168
9	47.329	47.309
10	48.026	48.007
11	47.269	47.251
12	46.389	46.371
13	46.477	46.457
14	47.141	47.122
15	46.375	46.356
16	45.626	45.608

次に、2つの節点において場所的水量変動が生じたときの圧力変化を調べてみる。節点5, 6の取出し水量がそれぞれ150から1150 l/sec, 300から800 l/secに変動したときに、各管内

流量について

$$\{Q_{ij}(5;1150|6;300) - Q_{ij}(5;150|6;300)\} \\ + \{Q_{ij}(5;150|6;800) - Q_{ij}(5;150|6;300)\}$$

なる値と

$$Q_{ij}(5;1150|6;800) - Q_{ij}(5;150|6;300)$$

なる値の比をとると表-10のごとくである。これらの値がほぼ1に近い値であることから、節点取出し水量変化と管内流量変化の間には微小変化における加法性が成立しているといえよう。したがって、節点 i , l の取出し水量がそれぞれ p_i から $p_i + \Delta p_i$, p_l から $p_l + \Delta p_l$ に変動したときの管内流量は次式によって近似される。

$$Q_{ij}(i; p_i + \Delta p_i | l; p_l + \Delta p_l) \\ = Q_{ij}(i; p_i + \Delta p_i | l; p_l) \\ + Q_{ij}(i; p_i | l; p_l + \Delta p_l) - Q_{ij}(i; p_i | l; p_l) \dots \dots (5)$$

式-(5)を前提にすると、節点取出し水量変化と損失水頭変化の間にも加法性の成立つことが証明される。表-10には、損失水頭の場合の計算結果も示してある。上記の加法性から、取出し水量変化と節点エネルギー位変化の間にも加法性が当然成立するはずであるから、式-(5)と同様に

$$E_i(i; p_i + \Delta p_i | l; p_l + \Delta p_l) = E_i(i; p_i + \Delta p_i | l; p_l) \\ + E_i(i; p_i | l; p_l + \Delta p_l) - E_i(i; p_i | l; p_l) \dots \dots (6)$$

として節点エネルギー位が推定される。上述の計算例に用いたと同じ数値に對し、式-(6)から推定される値と実際の計算によって得られる節点エネルギー位 $E_i(5;1150|6;800)$ を比較したのが表-11である。

3-2 増・減圧量変化にともなう圧力変化

通常の管網は、網目状を成しているいわば管網本体とそれより派生している管路(配水池から管網本体への流入管や郊外地へ配水する管路など。)により構成されている。管網運転時であっても、後者の管路に設置された増・減圧施設の増・減圧量を設定することは比較的容易である。しかしながら前者の場合には、増・減圧量変化にともなう管網内圧力変化のデータの積重ねととの解析にともづかなければならない。ここでは、管網本体内部におかれた増圧ポンプまたは減圧弁の増・減圧量変化に応じて管網内圧力がどのように変化するかを水理計算によって調べてみる。

計算対象とした管網は図-4(流速係数はすべての管路について $C=100$ とした。)のごとくであり、増・減圧状態とそのときの節点 i におけるエネ

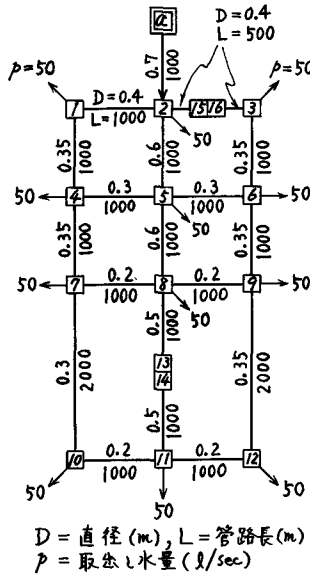


図-4 管網図(増・減圧)

表-10

節点取出し水量変化
に対する加法性

管路	流量	損失水頭
1-2	1.000	0.924
1-5	1.066	1.006
1-6	1.066	0.974
2-3	0.920	0.896
2-6	0.990	0.896
3-4	0.907	0.897
3-7	0.922	0.880
4-8	0.907	0.876
5-6	0.971	1.042
5-9	1.045	1.033
6-7	0.902	0.928
6-10	1.323	1.341
7-8	0.864	0.869
7-11	0.961	0.948
8-12	0.936	0.925
9-10	1.045	1.051
9-13	1.045	1.043
10-11	0.947	0.960
10-14	1.280	1.287
11-12	0.928	0.932
11-15	0.989	0.986
12-16	0.958	0.953
13-14	1.045	1.046
14-15	0.980	0.988
15-16	0.958	0.962

表-11

節点取出し水量変化に
に対する加法性を用いた
節点エネルギー位(m)の推定

節点	推定値	計算値
1	47.961	47.926
2	49.057	49.018
3	48.401	48.348
4	47.547	47.486
5	46.804	46.744
6	48.004	47.897
7	47.353	47.258
8	46.645	46.554
9	46.307	46.220
10	47.359	47.256
11	46.660	46.560
12	45.802	45.705
13	45.624	45.531
14	46.455	46.354
15	45.740	45.640
16	45.015	44.917

表-12 増・減圧量変化に対する節点エネルギー位の変化

増・減圧 とその箇所	節 点	増・減 圧 比 : γ			
		2	3	4	5
増 圧 13-14	5	1.927	2.793	3.606	4.372
	8	1.943	2.837	3.691	4.507
	10	1.892	2.689	3.400	4.034
	13	1.971	2.919	3.847	4.758
	15	1.901	2.721	3.475	4.172
増 圧 15-16	5	1.964	2.897	3.808	4.705
	8	1.953	2.863	3.733	4.566
	10	1.945	2.840	3.689	4.493
	13	1.947	2.844	3.629	4.493
	15	2.051	3.155	4.318	5.553
減 圧 13-14	5	2.092	3.305	4.701	6.448
	8	2.072	3.241	4.557	6.164
	10	2.124	3.394	4.836	6.480
	13	2.038	3.129	4.307	5.668
	15	2.135	3.450	5.072	7.359
減 圧 15-16	5	2.043	3.134	4.284	5.501
	8	2.052	3.162	4.337	5.588
	10	2.060	3.187	4.389	5.679
	13	2.057	3.178	4.369	5.642
	15	1.950	2.850	3.697	4.487

ルギー位 E_i を表示するため次のごとき記号を用いることにする。

$$E_i(B_{k,e}-B_{k,o}; S_k+V_k | B_{l,e}-B_{l,o}; S_l+V_l | \dots \\ \dots | B_{n,e}-B_{n,o}; S_n+V_n)$$

ここで, $B_{k,e}, B_{l,e}, \dots, B_{n,e}; B_{k,o}, B_{l,o}, \dots, B_{n,o}$

はそれぞれ増・減圧箇所における流入側, 流出側の節点番号を表わし, $V_k, V_l, \dots, V_n$ は基準増・減圧値 $S_k, S_l, \dots, S_n$ に対してさらに付加される増・減圧量である。たとえば, 節点3と4の間で基準増圧値3mに対してさらに5m増圧し, 節点7と8の間で減圧弁を動作させることによって減圧値を4mに設定したときの節点2のエネルギー位は次のごとく表わされる。

$$E_2(3-4; 3+5 | 7-8; 0-4)$$

基準増・減圧値 S_k からさらに $\bar{V}_k$ だけ増・減圧したときの節点エネルギー位の増分を分母とし, $\gamma \times \bar{V}_k$ だけ増・減圧したときの増分を分母とした

$$Y_i = \frac{E_i(B_{k,e}-B_{k,o}; S_k \pm \gamma \times \bar{V}_k) - E_i(B_{k,e}-B_{k,o}; S_k)}{E_i(B_{k,e}-B_{k,o}; S_k \pm \bar{V}_k) - E_i(B_{k,e}-B_{k,o}; S_k)}$$

なる比 Y_i (ただし, 複号は増圧のとき正, 減圧のとき負をとるとし, γ を増・減圧比と名づける。) を計算し, その一部を示すと表-12のごとくである。ただし, $S_k = 0, \bar{V}_k = 2m, \gamma = 2, 3, \dots, 5$ とし, 増圧あるいは減圧箇所は節点13と14あるいは15と16の間とした。表-12によると上記の比 Y_i と増・減圧比 γ との間には比例性がない。むしろ $\log Y_i$ と $\log \gamma$ の関係の一部示

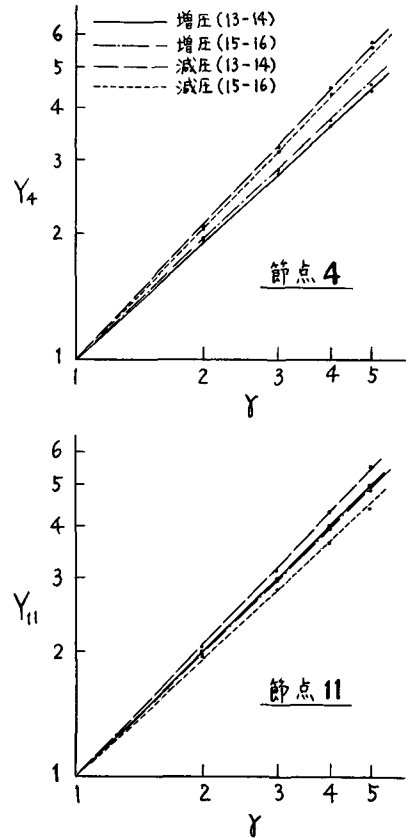


図-5 Y_i と γ の関係

した図-5から見て

$$Y_i = \gamma^{\alpha_i} \quad \dots \dots \dots (7)$$

なる関係が成立するようである。式-(7)を用いると、増・減圧量変化に対する節点エネルギー位は次式から求められる。

$$\begin{aligned} E_i(B_{R,e}-B_{R,0}; S_R \pm \gamma \bar{V}_R) \\ = \gamma^{\alpha_i} \{ E_i(B_{R,e}-B_{R,0}; S_R \pm \bar{V}_R) - E_i(B_{R,e}-B_{R,0}; S_R) \} \\ + E_i(B_{R,e}-B_{R,0}; S_R) \quad \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

$B_{R,e}=13$, $B_{R,0}=14$, $S_R=0$, $\bar{V}_R=4$ m なるときに、まず $\gamma=2.5$ として α_i を求め、次いで $\gamma=4$ としたときに式-(8)から得られる推定値と実際の計算によって求められる $E_i(13-14; 0+4 \times 4)$ の値を比較したのが表-13である。増圧の場合にはこの表に見られるように、外挿によってよい推定が行なわれるが、減圧に対して式-(8)を使用するときは、外挿を避けて内挿だけに

とめた方がよい。

次に、管網内の2箇所において増圧あるいは減圧が行なわれた場合の加法性について調べてみる。加法性が成立するならば、節点エネルギー位は次式によって求められることになる。

$$\begin{aligned} E_i(B_{R,e}-B_{R,0}; S_R \pm V_R | B_{L,e}-B_{L,0}; S_L \pm V_L) \\ = E_i(B_{R,e}-B_{R,0}; S_R \pm V_R | B_{L,e}-B_{L,0}; S_L) \\ + E_i(B_{R,e}-B_{R,0}; S_R | B_{L,e}-B_{L,0}; S_L \pm V_L) \\ - E_i(B_{R,e}-B_{R,0}; S_R | B_{L,e}-B_{L,0}; S_L) \quad \dots \dots (9) \end{aligned}$$

実際の計算によって得られる $E_i(13-14; 0+10 | 15-16; 0+4)$, $E_i(13-14; 0-4 | 15-16; 0+10)$ と式-(9)から得られる推定値を比較したのが表-14である。この結果から加法性が成立するとみなしてよいであろう。

4. ま と め

配水コントロールのための水理計算について述べた本論文の要点を再記すると次のごとくである。

(A) 2つ以上の配水池を運用する多点注入系においては、配水コントロール上有利な方式を選定する必要がある。

(A-1) 多点注入系を配水池からの流入方式と配水池水位関係によって分類し、それぞれの方式における条件式の本数と未知数の個数を明らかにした(表-1)。

(A-2) 管網内圧力状態を知る上で有効な方式は、配分流入方式における1水位一定方式と水位可変方式および自由流入方式における m 水位指定の m 水位一定方式と m 節点エネルギー位指定の水位可変方式である。これらの方式においては、各節点取出し水量が一様に 1 倍になった

表-13 式-(8)による節点エネルギー位(m)の推定

節点	α_i	推定値	計算値
1	0.904	32.308	32.299
3	0.858	32.310	32.296
4	0.901	30.433	30.412
5	0.894	32.062	32.069
6	0.854	30.436	30.407
7	0.891	29.270	29.216
8	0.919	30.683	30.697
9	0.847	29.278	29.206
10	0.826	29.248	28.998
11	1.004	43.748	43.760
12	0.802	29.281	29.099
13	0.964	29.212	29.228
14	1.004	45.225	45.228

表-14 増・減圧量変化に対する加法性を用いた節点エネルギー位(m)の推定

節点	(13-14)10m, (15-16)4m		(13-14)-4m, (15-16)10m	
	推定値	計算値	推定値	計算値
1	32.300	32.310	32.143	32.136
3	35.103	35.061	38.881	38.942
4	30.417	30.435	30.074	30.061
5	32.436	32.459	33.067	33.039
6	31.743	31.671	32.579	32.698
7	29.026	29.042	27.942	27.938
8	31.225	31.252	32.232	32.213
9	29.984	29.961	29.522	29.484
10	28.396	28.387	24.959	24.998
11	38.914	38.928	27.317	27.333
12	29.493	29.568	27.443	27.141
13	30.070	30.090	31.774	31.773
14	40.070	40.090	27.774	27.773
15	33.224	33.203	32.113	32.143
16	37.224	37.203	42.113	42.143

ときの節点エネルギー位は式-(1)から求められる。

(B) 管網運転時には水理計算よりもむしろ統計計算の方が重要になると思われるが、統計分析における構造模型の設定あるいは予測式の関数形を決定する上で水理計算の果たす役割は大であろう。

(B-1) 節点取出水量の場所的変動と管網内圧力変化との間には比例性と加法性が成立し、節点エネルギー位はそれぞれ式-(4)、式-(6)によって推定される。

(B-2) 管網内圧力変化は増・減圧比のべき乗に比例し、節点エネルギー位は式-(8)によって推定される。一方、増・減圧量変化と圧力変化の間には加法性が成立し、節点エネルギー位は式-(9)によって推定される。

終わりに、本研究を行なうにあたり御指導いただいた北海道大学工学部教授丹保憲仁博士に謝意を表する。

＜参考文献＞

- 1) 坂根稔一郎；「配水コントロール概論」水道協会雑誌，第408号，p.31～35(1968.9)
- 2) 高桑哲男；「管水路における流速公式の比較と計算手順について」第3回衛生工学研究討論会講演論文集，p.65～73(1966.11)
- 3) 高桑哲男；「配水管網流量計算法に関する研究(IV)」水道協会雑誌，投稿中。
- 4) 高桑哲男；「節点エネルギー位を未知数とした計算法の改良」衛生工学，第17号，(1969.12発行予定)投稿中。