

配水管の最適制水弁間隔の決定に関する研究

OPTIMUM DECISION OF VALVE INTERVAL OF
WATER DISTRIBUTION PIPE

松 尾 稔*・堀 内 孝 英**

By Minoru MATSUO and Takahide HORIUCHI

1. まえがき

市街地における配水管は道路網のほぼ全域にわたって埋設され、他の公共埋設施設（ガス管、下水管など）とともに都市機能上重要な役割を果している。配水管がなんらかの原因によって損傷を受けた場合、その修理、復旧のため水の輸送、分配、給水が停止されるから、市民生活に大きな影響を与える。水道の使命は連続給水を行うことである。したがって、水量あるいは水質管理上の「停水」や事故あるいは計画作業上の「断水」は、市民生活を守るためにあってはならないのが基本理念である。しかし、現実的には給水の停止あるいは断水が生ずる。

給水の停止や断水の原因としては、計画的に行われる漏水修理、配水コントロール、水質管理、新管布設、既設管の移設、撤去などによるものと、不測の突発事故による配水管の折損などによる緊急的なものとに分類できる。前者の場合には、事前に断水地域が予告され、かつ、一般に水需要の少ない夜間に実施されることが多いから、市民生活への影響は最小限に留められる。これに対し、不測の突発事故による配水管の折損はいつ、どこで発生するかわからないから、一般に折損の修理、復旧に伴う断水の影響度は前者に比べてはるかに大きい。また、その程度は配水管の機能、断水地域の特性（給水人口、用途地域別など）、供給給水量、断水時間や時間帯などによって当然異なる。すなわち、大口径の配水管の断水は広域的な影響を与え、小口径配水管の断水による支障は普通局部的である。しかし、もちろんこれらは、あくまでも相対的なものであって、市民生活にとり重要でない管があるという意味ではない。ところで、突発事故による配水管の折損を皆無にすることは不可能である。したがって、前述した水道の基本理念とは

別に、事故による断水に対処するためには、市民生活に及ぼす影響を最小限にするための方策が講じられてなければならない。

本論文は、埋設管に関する一連の研究^{①~⑤)}の一環として、配水管系のうち特に配水支管を対象に、突発事故（地震災害を除く）の実態を統計・確率的に分析し、経済的に評価できる制水弁の最適間隔を決定するための基本的な方法論の提示を主眼においているものである。すなわち、まず2.では、配水支管の「断水する管路の長さ」（以下簡単のため「断水管路長さ」とよぶ）の現況を制水弁を閉止する数（以下簡単のため「閉止制水弁数」とよぶ）を地域特性との観点からは握り、3.では、配水支管の折損実態調査をもとに、折損を地盤との関係において検討している。これらに基づいて配水支管の破壊確率を4.で求めている。5.では、配水支管の最適制水弁間隔の決定について、破壊確率を考慮した費用関数を述べ、さらに6.においては、モデルケースに関する多くの数値例をあげ、経済的な意味での配水管の制水弁の最適間隔について考察を加えている。このように、5., 6.では、経済的なモデルをもとに制水弁の最適間隔の決定がなされている。水道の問題は前述した理念の観点に立てば、経済性を度外視しても断水が起らぬようにすべきかもしれないが、現実には事故を零にすることは信頼性の面からみても不可能に近い。また、事故のリスクを小さくしようとすればするほど費用は飛躍的に増大し、現実問題として実行が不可能になるから、ある程度、経済性を考慮し決定していく必要が生ずる。その代り、事故による断水にあたっては、即刻、給水車による給水などの配慮がなされるべきであり、そのうえでの経済的評価であることを強調しておきたい。

2. 配水支管の断水管路長さの現況

計画的、緊急的にかかわらず、配水管諸作業に伴う断

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土圧研究施設

** 正会員 名城大学助教授 理工学部建築学科

水管路長さは、配水管網内の1箇所ないし数箇所の制水弁を閉止することによって形成される。配水管の断水による市民生活への影響度は断水管路長さとその地域によって異なる。たとえば、同一の断水管路長さであっても、その地域の人口密度や、その地域が住居地域であるとか商業地域であるとかによって異なる。したがって、断水管路長さの実態を地域特性との関係で検討することはきわめて重要である。

ここでは、名古屋市における口径50~300mmまでの

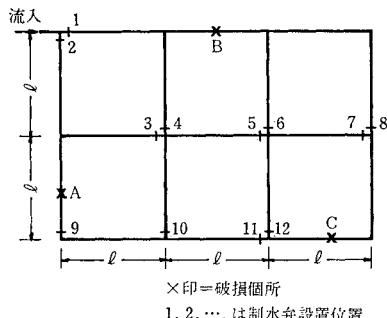


図-1 断水管路長さ算定の模式図

配水支管を対象に、断水管路長さの実態を調べた結果を示す。これらは、配水管詳細図をもとに、図面上で制水弁を閉止することによって形成された断水管路長さを求めたものである。図-1は断水管路長さを求めるための模式図である。同図は一辺 l の規則正しい6網目管路で、1, 2, ..., 12は制水弁の位置を示す。たとえば、Aで折損が生じた場合、その影響を最小限にするために2, 3, 9の制水弁を閉止する必要がある。その結果、この場合の断水管路長さは $3l$ となる。同様にして、B, Cなどで折損が生じた場合の閉止制水弁数と断水管路長さが求められる。断水地域の地域特性の表現としては簡単のため給水密度をもって代表させた。給水密度に関する資料としては、名古屋市の給水密度分布図⁶⁾(年間でもっとも水需要の多い8月の給水量 $Q(\text{m}^3/\text{day}/\text{km}^2)$ が8段階に区分されている)を用いた。

図-2は、閉止制水弁数と断水管路長さとの関係を示したものである。図中には各閉止制水弁数に対する断水管路長さの平均値も△印で併記してある。この図から、配水支管の断水管路長さや閉止制水弁数には大きな幅があることがわかるが、一般に、断水管路長さの平均値は閉止制水弁数の増大に伴って長くなる傾向を示している。なお、この図では給水密度の差は考慮されていない。

図-3は、断水管路長さと給水密度との関係を示したもので、図中には各給水密度区分内における断水管路長さの平均値も△印にて併記してある。この図から、断水管路長さは同一給水密度地域内でも大幅にばらつき、特に断水管路長さの平均値に注目すればわかるように、配水支管の断水管路長さは給水密度によって顕著な差は認められない。

次に、給水密度が閉止制水弁数と断水管路長さとの関係に与える影響を調べた。その一例が図-4であり、他の給水密度に関しても傾向は同様であった。そこで、同一の給水密度に対しては、各

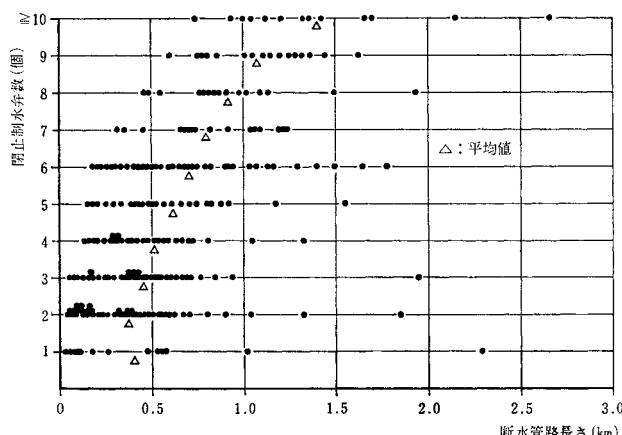


図-2 閉止制水弁数と断水管路長さとの関係

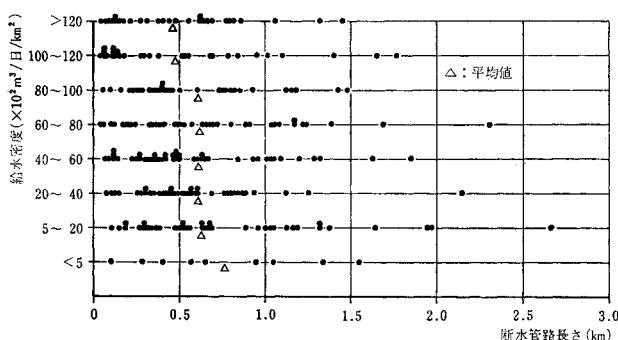


図-3 給水密度と断水管路長さとの関係

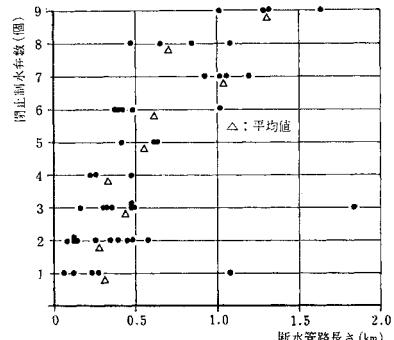


図-4 閉止制水弁数と断水管路長さ(給水密
度 4 000~6 000 $\text{m}^3/\text{day}/\text{km}^2$ の場合)

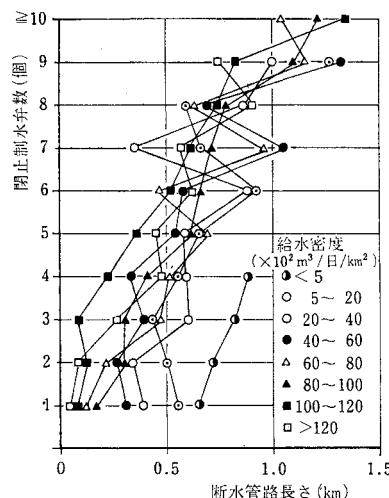


図-5 閉止制水弁数と給水密度別の平均断水管路長さの関係

閉止制水弁数に関する平均断水管路長さ(たとえば図-4の△印)を代表させ、給水密度をパラメーターとしてまとめたものが図-5である。図-5から、各給水密度別の断水管路長さは、閉止制水弁数の増大に伴って長くなる傾向を示す。しかし、同一の閉止制水弁数に関してみてみると、断水管路長さは給水密度の大小に対して一定の傾向を示さない。このことは、閉止制水弁数が多くなればなるほどはなはだしくなる。

以上より、実態としての配水支管の断水管路長さが給水密度とほとんど関係していないことが明らかとなった。このように断水管路長さ(いいかえると、閉止制水弁の間隔)に給水密度(いいかえると、その地域に与える断水の影響の程度)が考慮されていない実態には、基本的な配管網計画の立場から疑問を提さざるをえない。後に示すような、この点を考慮した設計が今後配水管の作業性^{8)~11)}とあわせて重要となるであろう。

3. 配水支管の折損と地盤

都市における配水支管はあらゆる地盤中に埋設されているので、不測の突発事故の実態を地盤特性との観点から分析しておくことが、後に示す制水弁の最適配置計画のための準備事項として必須である。配水管の事故には、一般に管体部の折損と亀裂および継手部のゆるみ、抜けなどがあげられる。これら事故のうち、管体亀裂や継手のゆるみによる事故も当然漏水による配水管路の機能低下をもたらすが、その修理にあたっては断水せ

る必要はない。これに対し、管体の折損は配水管路の機能を麻痺させると同時にその修理、復旧にあたっては必ず断水を伴う。一方、継手部の抜けによる事故も配水管路の機能を完全に麻痺させるが、この種の事故は地震時を除いてはほとんどみられない。以上のことから、以下の検討は配水管の折損のみを対象に行う。

ここでは、名古屋市における昭和47年度の配水管の折損実態資料に基づく分析結果を示す。表-1は、名古屋市で発生した配水支管の折損件数を管の口径および原因系別に整理して示したものである。この表より、配水支管の折損は交通荷重を原因とするものが普通鉄管、石綿セメント管とも全折損件数の過半数を占め、ついで第三者加害、不同沈下を原因とする折損が多く、これら3つの原因系が配水支管の折損の主体をなしていることがわかる。これに対して、他の原因系による折損は非常に少ない。ただ、石綿セメント管においては、老朽化による折損が少し多いことがめだっている。

ここに、配水支管の折損の原因としての第三者加害とは、ガス管、下水管などの埋設工事や建設基礎工事、道路舗装工事など、種々の建設工事が直接配水支管に損傷を与える人為的なものであって、原因が明確である。これに対し、他の原因系には事故調査をした現場員の主観的な面も入るので、ややあいまいな点もあるが、大筋ではまちがいない分類と考えられる。第三者加害による配水支管の事故は他の原因と同様、現実には偶発的に生ずるものであるが、これは人為的なものであって、本論文における力学的な検討の対象外におかれるべきものである。すなわち、この種の事故をなくすことは単に配水支管のみならず、他のすべての埋設管の安全性確保のためにもっとも基本的な問題であり、埋設位置を明示した図面の整備、利用などの対策によって別途解決されるべきものである。したがって、このような事故は決して起こしてはならないという立場から、第三者加害による配水支管の折損はここでは除外し、他の原因系の折損を対象に地盤との関係で検討を加える。

表-1 口径・原因系別の折損件数(昭和47年度名古屋市水道局調査)

口径 $D(\text{mm})$	原因系別 折損件数						計
	交通荷重	第三者加害	不同沈下	深度不足	老朽化	その他	
50	23	5	4		1 (2)		33 (2)
75	65 (67)	17 (23)	25 (12)	3 (2)	3 (8)	2 (2)	115 (114)
100	62 (30)	28 (14)	22 (3)	1 (2)	2 (1)	1 (1)	116 (51)
125	(2)	1 (2)					1 (4)
150	21 (2)	13 (1)	9	2	(1)	1 (1)	46 (5)
200	12 (1)	6	3				21 (1)
250	1	1					2
300	2	3					5
計	186 (102)	74 (40)	63 (15)	6 (4)	6 (12)	4 (4)	339 (177)

() 内は石綿セメント管、他は普通鉄管の件数を示す。

配水支管の折損と地盤との関係を検討するに際し、地盤の硬軟に着目した。そのためやすとしては標準貫入試験結果の N 値（以下単に N 値という）を採用した。名古屋市域の N 値に関する資料は名古屋地盤図³⁾によった。 N 値に関しては、地表面から深度 5 m までの土質を無

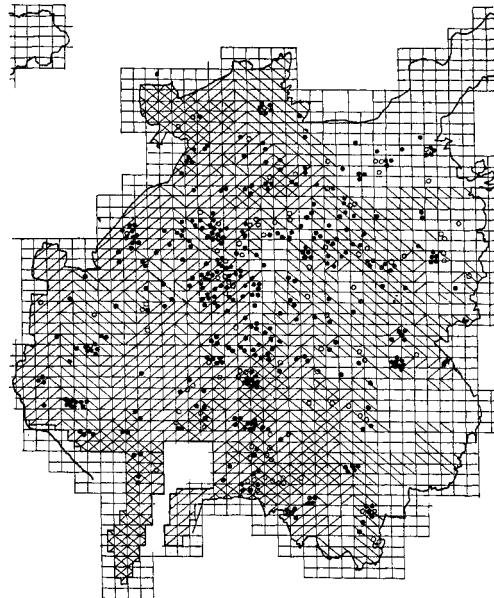


図-6 平均 N 値分布と折損地点

表-2 各 N 値区分内における口径・管種別の折損件数（ただし、第三者加害を除く）
(昭和 47 年度分)

口径 D (mm)	管種	N 値区分内の折損件数と管の埋設延長									
		$N < 4$		$4 < N < 10$		$10 < N < 20$		$N > 20$		計	
		件数	延長(m)	件数	延長(m)	件数	延長(m)	件数	延長(m)	件数	延長(m)
50	CIP	7	4 771	12	10 734	6	15 107	3	9 144	28	39 756
	ACP		957		2 152	2	3 029		1 832	2	7 970
75	CIP	18	48 123	35	108 277	35	152 390	10	92 235	98	401 025
	ACP	20	14 746	33	33 179	20	46 697	18	28 265	91	122 887
100	CIP	20	166 642	31	374 944	27	527 699	10	319 396	88	1 388 681
	ACP	6	11 141	11	25 067	18	35 279	2	21 352	37	92 839
125	CIP		0		0		0		0		0
	ACP	1	1 311	1	2 950		4 152		2 512	2	10 925
150	CIP	8	66 514	13	149 656	8	210 627	4	127 485	33	554 282
	ACP	2	4 655	1	10 474	1	14 741		8 921	4	38 791
200	CIP	3	34 836	5	78 382	4	110 315	3	66 769	15	290 302
	ACP	1	1 525		3 430		4 828		2 922	1	12 705
250	CIP		3 990	1	8 977		12 634		7 647	1	33 248
	ACP		287		646		909		549		2 391
300	CIP	1	18 112		40 753	1	57 356		34 716	2	150 937
	ACP		423		953		1 341		812		3 529
計	CIP	57	342 988	97	771 723	81	1 086 128	30	657 392	265	2 858 231
	ACP	29	35 045	47	78 851	41	110 976	20	67 165	137	292 037

CIP：普通鉄管 ACP：石綿セメント管

視した平均 N 値を $N < 4$, $4 < N < 10$, $10 < N < 20$, $N > 20$ の 4 つの階級に区分した。このような区分は地盤工学の面からみて妥当である^{3), 4)}。

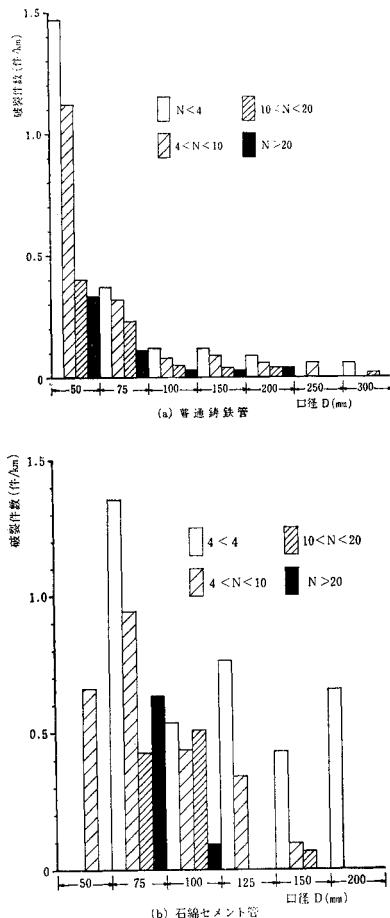
図-6 は、名古屋市における標準メッシュ図（単位メッシュが 500 m × 500 m）を用いて、地表面から深度 5 m までの平均 N 値分布図を作成したものである。昭和 47 年度の配水支管の折損地点をプロットしたものである。この図より、配水支管の折損を地盤との関係で平面的には握ることができる。しかし、ここでの主たる目的は配水支管の折損を地盤との関係で定量的には握ることであるから、図-6 をもとに配水支管の N 値別の折損件数を口径、管種別に示すと表-2 のようになる。配水支管の折損を地盤との関係で定量的に検討するためには、各 N 値区分内の口径別の埋設延長が必要であるが、これを知る統計的資料はない。そこで、ここでは各口径の配水支管は市域に一様に分布しているものと仮定して、各口径の埋設総延長（表-2 の右端列に示されている数値で、これは実延長である）を N 値区分の面積比に配分し、これを各口径の N 値区分内の埋設延長とした。

図-7 (a), (b) は、配水支管の口径別の単位長さ (1 km) 当りの折損件数を N 値との関係で示したものである。(a) 図に示す普通鉄管の折損は、各口径とも N 値の増大に伴って減少していることが明らかである。一方、(b) 図の石綿セメント管では、折損は N 値が増大するとだいたい減少していく傾向を示すが、(a) 図ほど明確な関係はない。これは、名古屋市においてはここ十

数年来、石綿セメント管が新設管として埋設されていないため、石綿セメント管そのものが存在しない地域があるためである。普通鉄管の折損が地盤の N 値に明確に関係することを考えれば、もし石綿セメント管がすべての地域に均一に埋設されているならば、同じ傾向を示すと考えの方が妥当であろう。

4. 配水支管の破壊確率

配水支管の折損には表層地盤の N 値が大きく影響することが明らかとなった。そのため、配水支管の破壊確率 P_f は地盤の N 値と関連させて考えていくのが工学的にみて合理的である。配水管路

図-7 口径別の折損件数と N 値との関係

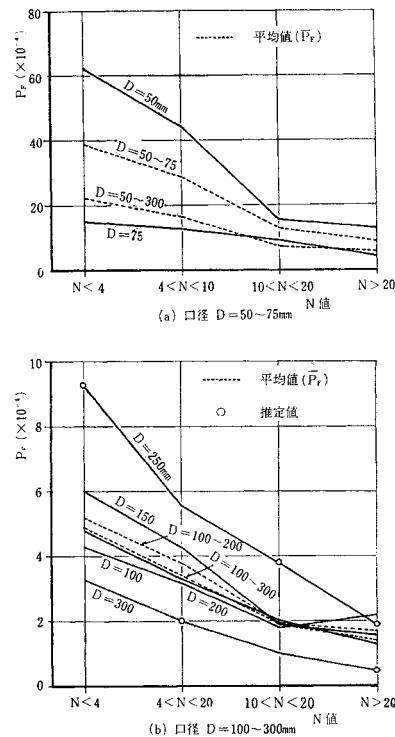
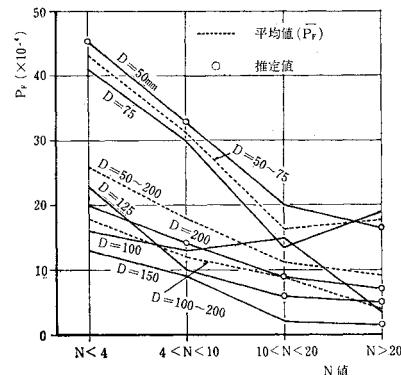
は管と管を接合することによって、構成される。たとえば、普通鉄管や石綿セメント管は継手によって、また、鋼管は溶接によって接合される。したがって、配水管の破壊確率 P_F は折損件数と管路を構成する管の本数との比によって求められる。すなわち、地盤の N 値別による口径、管種別の破壊確率 P_F は次式により計算できる。

$$P_F = n/a \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここに、 n ：各 N 値区分内の管種、口径別の折損件数

a ：各 N 値区分内の管種、口径別の管の本数である。

図-8, 9 は、表-2 をもとに式 (1) を用いて、普通鉄管と石綿セメント管の破壊確率を N 値との関係で、口径を パラメーターとして描いたものである。すなわち、これは既設配水支管に関する破壊確率の実態である。なお、破壊確率の算定にあたって、 a は表-2 の埋設延長に関して、普通鉄管 1 本の長さを口径 $D=50\sim100$ mm は 4 m, $D=150\sim200$ mm は 5 m, $D=300$ mm は 6 m とし、また、石綿セメント管 1 本の長さは口径

図-8 普通鉄管の口径別破壊確率 P_F と N 値との関係図-9 石綿セメント管の口径別破壊確率 P_F と N 値との関係

に関係なくすべて 3 m として求めた。ここに、3 m とした理由は、① 名古屋市水道局においては、ここ十数年前より石綿セメント管の埋設が行われていない。②そのため、石綿セメント管の分布の実状が明確でない。③ 石綿セメント管の全埋設延長に対する口径 100 mm 以下の、いわゆる規格長さ 3 m の管が全体の約 80% を占めていることによる。

図-8, 9 より、普通鉄管、石綿セメント管の破壊確率は各口径とも N 値の増大とともに減少するが、大略 $N=10$ を境にして、破壊確率の減少率は $N < 10$ で

大きく、 $N > 10$ では小さいことが認められる。また、石綿セメント管の破壊確率は普通鉄管に比べ大きいこと、および石綿セメント管、普通鉄管の口径 100 mm 以下の破壊確率は他に比べてかなり大きいことがわかる。また、配水支管の口径にかかわらない平均的な破壊確率 \bar{P}_F を各 N 値に対し求め図中に併記した。ここに、 $D = 100 \sim 200$ などとあるのは、この点線が $D = (100 \sim 200)$ mm の範囲の管に関する平均線であることを示している。配水支管路は一般に各口径管の組合せによって構成されているので、個々の口径別に管の折損に対する設計を行うのが困難かつ実際的でない場合がある。いいかえると、配水支管路全体を 1 つのシステムとして、平均的な見地からその機能を考えざるをえない場合があるわけで、このようなときには、平均的な破壊確率を考慮する必要が生ずる。

5. 制水弁の最適間隔の決定

配水支管の断水による市民生活への直接的影響を少なくするために、配水支管網内の制水弁設置数を多くし、断水する管路の長さを短くする必要がある。しかし、経済的な側面からみた場合には、制水弁設置数を多くすればするほどよい、というわけにはいかない。適正な妥協が必要である。配水支管路に付帯する制水弁の設置間隔の優劣を比較するためには、単に配水支管路の単位長さ当たりの制水弁設置費の大小を比べるだけではなく、制水弁をも含む配水支管路の将来にわたる維持管理費も考慮に入れなければならない。そのためには、将来の費用や便益を現在の時点に引きもどした現在価値で測るのが有効である。配水支管路の費用、便益関数を示すと、式(2) のように表される。

$$P_W = \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \left\{ C + \sum_{t=1}^n \frac{M_t}{(1+r)^t} \right\} \dots (2)$$

ここに、 P_W は現在価値、 B_t は便益、 C は初期投資額(埋設費など)、 M_t は維持管理費(修理、復旧費など)、 r は社会割引率、 t は耐用年限である。

上式において、右辺第 1 項の配水支管路がもたらす便益は制水弁の数や配置に關係なく不变と考えてよいかから、最適解は右辺第 2 項の期待総費用を最小にすることによって求められる。実務設計にあたっては、期待総費用に関する費用項目について詳細に検討し、できるだけ実状にあった数値を用いるべきである。しかし、たとえば維持管理費 1 つをとってみても、耐用年限の取り方、老朽化に伴う維持管理費の経年的変化などは、配水支管路個々の条件(管種、口径、地盤条件、人口密度など)によって異なるので、ここですべての場合を正確にあてはまるような形で表示することは困難である。そこで、

本論文では基本的な方法論を提示すること目的に、次式のような簡略化した費用関数を用いることにする。

$$C_T = C_C + C_W + P_F C_F \dots (3)$$

ここに、 C_T は期待総費用、 C_C は管の埋設費、 C_W は待機損失費(破壊の有無にかかわらず常に確保しておかなければならぬ給水車、広報車などの費用)、 C_F は破壊損失費で、 $P_F C_F$ は確率 P_F で配水支管が破壊したときに予期される損失費である。式(3)は式(2)を 1 年間の単位で書き直したものである。すなわち、式(3)における C_C と C_W は式(2)の C を耐用年限で割ったものに、また、 $P_F C_F$ は M_t に対応するものである。この場合、正確には P_F には耐用年限内での変化を考慮に入れた数値を用いねばならないが、現在のところ、このようなデータの集積がなされていないので、ある 1 年間に關して得られた数値を用いざるをえないであろう。式(3)の C_C と C_F の詳細は以下のようにある。

$$\left. \begin{aligned} C_C &= C_{cc} + C_{cm} + C_V \\ C_F &= C_{cr} + C_L + C_S \\ C_{cr} &= C_{cc}' + C_{cm}' \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

ここに、 C_{cc} は施工費、 C_{cm} は材料費、 C_V は制水弁設置費である。 C_{cr} は復旧費で、復旧に対する施工費 C_{cc}' と材料費 C_{cm}' の和として与えられる。 C_L は配水支管の損傷に伴う漏水損失費、 C_S は断水地域への給水車による給水費である。上記各費用には一般諸経費が含まれる。以上より、配水支管埋設に要する期待総費用 C_T は結局次のように書ける。

$$C_T = C_{cc} + C_{cm} + C_V + C_W + P_F (C_{cm}' + C_{cc}' + C_L + C_S) \dots (5)$$

目的は式(5)において C_T を最小にするような適正な断水管路長さ $(l)_opt$ を求ることである。これは、配水支管路内における最適制水弁設置数または最適制水弁間隔 $(l_V)_opt$ を求ることと等価である。

図-10 は、断水管路長さ l と期待総費用 C_T の関係を模式的に表したものである。この図は横軸に制水弁数一定とした場合の断水管路長さ l 、縦軸に期待総費用

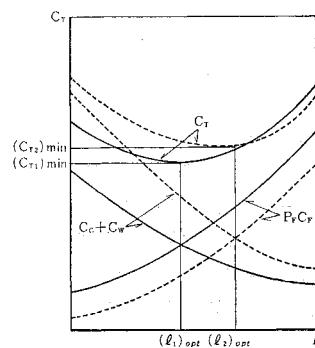


図-10 期待総費用～断水管路長さ関係の模式図

C_T (断水管路長さ 1 m 当り) がとてある。 l が短ければ、1 m 当りに換算した制水弁設置費 C_V は高くなり、結局 ($C_C + C_W$) は高くなるが、反面、破壊による損失費 $P_F C_F$ は安くなる。一方、 l を長くすれば、初期費用は安くなるが、 $P_F C_F$ は高くなる。したがって、各費用曲線は管種、口径、地盤、地域特性などによって、図-10 の実線や点線で例示したように異なるが、それぞれのケースにおいて C_T が最小となるような (l)_{opt} の存在が期待される。本論文で対象としている実施計画の段階では、費用最小という評価基準は妥当と考えられるので、 C_T 最小に関する断水管路長さ、すなわち、制水弁間隔が最適設計のめやすとなる。具体的な方法は数値計算例をあげて次章に示す。

なお、非常に複雑になるので、上記費用項目の中には含まれていないが、実際には考慮されるべき評価要因がある。たとえば、水量や水圧などの力学的要因、水質問題および作業性の問題などである。実際の設計にあたっては、ここに示したような経済的評価と合わせこれらの要因を含めた総合的な判断が必要であろう。

6. 数値計算例

この章では、式(5)に基づき管種、口径および地盤や地域の特性に見合った配水支管の最適な制水弁の間隔 (l_V)_{opt} について、数値計算をもとに検討する。

(1) 配水支管の条件

計算には次のような条件を設定する。

(a) 配水支管路は普通鉄管と石綿セメント管の口径 100, 150, 200 mm に限定して検討を行う。

(b) 対象とする配水支管は分岐点や交差点のない、いわゆる單一直線管路とし、水は両端部から注入できるものとする。また、單一直線管路の一端には制水弁があらかじめ設置されているものとし、制水弁間隔を種々変化させて検討する。たとえば、制水弁間隔が 100 m の場合には、次節で示す各費用は 100 m で割ることによって 1 m 当りに換算される。したがって、これは想定される單一直線管路に n 個の制水弁を等間隔に設置した場合に相当する。

(c) 配水支管路の埋設地盤は $N < 4$, $4 < N < 10$, $10 < N < 20$, $N > 20$ の 4 種類とする。

(d) 配水支管の破壊確率 P_F に関しては、4. で得られた普通鉄管および石綿セメント管の各 N 値別の平均破壊確率 \bar{P}_F のうち口径 $D=100\sim200$ mm の値を適用する。4. の破壊確率は既設管について求められたものであり、今後の新設管に関しては、材質や技術の進歩もあるから、より小さな破壊確率が期待されるが、具

表-3 材料費と施工費の単価

費用項目			初期埋設時	復旧時
材料費	石綿セメント管	口径 (mm)	100	2 000 円/m
		150	3 000 "	4 000 "
		200	5 000 "	6 000 "
C_{cm}	普通鉄管	口径 (mm)	100	5 000 円/m
		150	6 500 "	6 000 "
		200	8 500 "	7 500 "
施工費	C_{cc}	掘削費	1 000 円/m ³	
		残土処理費	1 800 "	
		土砂入替費	4 500 "	初期埋設時の3倍
		道路取扱・復旧費	20 000 "	
		土留め・矢板費	4 000 円/幅m	
諸経費			25%	25%

体的にどの程度の破壊確率になるかの予測は現在のところほとんど不可能である。さらに、図-8, 9 から明らかなように、平均破壊確率を使用するということは、管路網全体としてみれば必ずしも過大設計につながるとはいえない。この 2 つの点から、現在のところ、既設管に関する破壊確率を用いることは不当でない。

(2) 数値計算のための費用

式(5)を用いての数値計算にあたっては、各費用の単価とそれらの諸量が必要となるので以下に述べる。

初期埋設時および復旧時の材料費と施工費の各費用項目別の単価は表-3 に示すとおりである。ここに、初期埋設時の材料費 C_{cm} は管の埋設と継手接合の費用を含めた値を、また、復旧時の材料費 $C_{cm'}$ は修理費を含めた値である。施工費 C_{cc} に関しては、昼間と夜間によって単価は異なる。したがって、ここでは現行の常識的な昼間と夜間の施工費の平均的な値を採用した。なお、復旧時の施工費 $C_{cc'}$ は初期時の 3 倍とした。施工費の各費用項目に必要な諸量は初期時、復旧時とも標準的な掘削断面¹²⁾により求め、配水支管埋設単位長さ (1 m) 当りの費用とした。制水弁設置費 C_V に関しては、材料費を含め 1 か所当たりの設置費を口径 100, 150, 200 mm に対し、それぞれ 68 000 円、107 000 円、166 000 円とし、断水管路長さ当りに換算した。

待機損失費 C_W に関しては、緊急断水時対策として、常に断水に即応できる体制、すなわち、断水地域に必要な給水量をただちに供給するための給水車などの確保が必要である。そのためには、給水車の最適台数および配置などが当然問題となる。しかし、本試算例では断水地域に必要な給水量を供給するための給水車は確保されているものとする。これは、前述したように水道の基本理念の立場から当然の対処といえる。したがって、 C_W は断水地域の大小にかかわらず一定となり、最適解の決定には影響を及ぼさないので、実際の計算にあたってはこの費用項目を除外した。

給水費 C_S は、断水地域に必要な給水量を運搬するための給水車の稼動費（水の料金を含めた費用）とそれに伴う人件費の和として与えられる。ここに、稼動費は 300 (円/m³)、人件費は時間給 700 (円/人)とした。

稼動費算定のための給水量は地域の特性、断水時間、断水時刻および 1 人当たりの水使用量などによって異なる。ここでは、地域特性の表現として、配水支管路に沿う人口 P (人/km) をもって代表させ、都市中心部の人口密度の高い地域として $P=600$ (人/km)、都市周辺部の比較的人口密度の低い地域として $P=200$ (人/km) の 2通りについて考える。断水時間 T は 2 時間（通常復旧に要する時間）および 24 時間（種々の悪条件が重なった特殊な場合の 1 例）の 2通りの場合について考える。また、これら地域における水使用量は名古屋市の最大給水量¹³⁾を参考に 600 (l/人/日) とした。したがって、断水時間 $T=2$ および $T=24$ に対する 1 人当たりの給水量はそれぞれ 50 (l/人) および 600 (l/人) となり、各 P に対する総給水量が求められる。この条件は家庭内の生活のみならず、通常のすべての都市機能が断水によっても完全に確保される場合に相当する。しかし、この値は通常の日常生活用水量のみに限れば過大であるので、これに相当する 300 (l/人/日) とした場合についても試算を行った。この場合には $T=2$ および $T=24$ に対する給水量がそれぞれ 25 (l/人) および 300 (l/人) となる。なお、地震などの自然災害時には最小限の飲料水が確保されるだけでやむをえないという考え方もあるが、定常状態の時にはこのような過酷な条件を一般市民に荷するのには問題があるという立場をとっているので、上記の値よりもさらに少ない用水量については試算を省略している。

次に、人件費算定のための要員数は断水時間 2 時間の場合、給水量 1 m³ に対し 2 名、断水時間 24 時間の場合、給水量 5 m³ に対し 2 名とした。また、広報活動のための要員を給水量に関係なく 1 名とした。ここに、本試算例では断水対策のため常に要員を待機させておくという立場をとらないので、緊急断水に対し他のセクションの人間が仕事を中止して給水や広報活動にあたることにする。そのため、その損失をも加味し、1 人 1 時間当たりの人件費を 2 倍した値を用いた。なお、給水、広報活動に要する時間は断水時間 2 時間に對しては準備などを含め 3 時間、断水時間 24 時間に對しては実際の給水時間を 12 時間とした。したがって、断水時間 $T=2$ の人件費は 4 200 (円/人)、 $T=24$ に対しては 16 800 (円/人) となり、この値を計算に用いた。

折損によって生ずる漏水による損失費 C_L は 100 (円/m³) とした。漏水費算定のための漏水量は管口径、損傷の程度、水圧および漏水時間によって異なる。漏水量の

算出基準に関する統一したものがなく、各地方自治体独自の方法で算出している。そこで、漏水量の算出にあたっては、名古屋市における基準値を参考に、破損断面が口径の 80~100%、水圧 3 kg/cm²、漏水時間を 2 時間とした場合、口径 100, 150, 200 mm の漏水量は、それぞれ 176, 450, 866 (m³/2 h) となり、この値を用いて C_L を算定した。

以上の各費用については試算例であるから大都市の一 般例を参考にし、またこれらの将来における変動を考慮していないが、個々の具体的問題では必要とあればそれぞれの情況にいっそう適合した費用を設定すればよい。

(3) 試算結果の検討

期待総費用 C_T は上述の各費用を式 (5) に代入することによって算定できる。図-11 は試算結果の一例として口径 100 mm、断水時間 2 時間の場合について示したものである。この図は制水弁の間隔 l_V と期待総費用 C_T との関係を管種、地盤の N 値、配水支管路に沿う人口 P をパラメーターとして描いてある。 C_T の値には同一管種、同一口径の初期時材料費 C_{cm} および施工費 C_{cc} の単位長さ当りの費用はすべてのケースに対し一定であるので除外してある。なお、図中には C_T が最小値をとる最適制水弁間隔 $(l_V)_{opt}$ の位置を▲印にて示してある。この図より、 C_T が最小値をとる $(l_V)_{opt}$ は地盤の N 値、人口 P および管種によって異なることが明らかである。また、 $(l_V)_{opt}$ は石綿セメント管、普通鉄管とも地盤の N 値の増大に伴って長くなること、

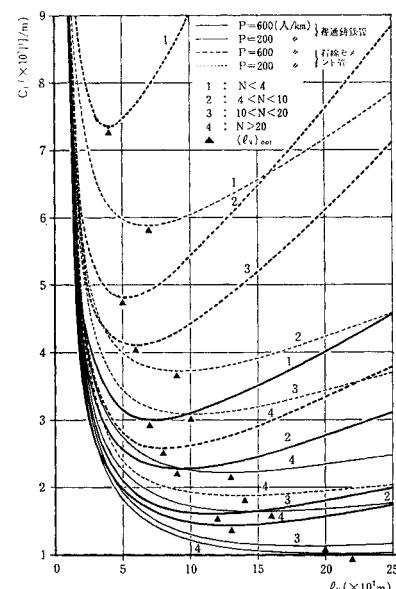


図-11 期待総費用と断水管路長さの関係
($D=100$ mm, 最大給水量 600 l/
人/日, 断水時間 $T=20$ の場合)

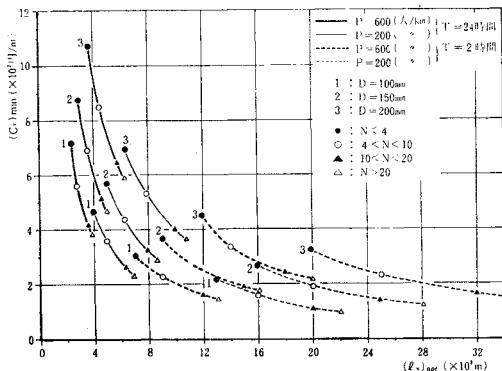


図-12 最大給水量 600 l/人日 における $(l_v)_{opt}$ と $(C_T)_{min}$ の関係（普通鉄管）

さらに、配水管路に沿う人口 P が多くなれば短かくなることがわかる。また、同一 N 値と P における $(l_v)_{opt}$ は、石綿セメント管の方が普通鉄管より短かいことも明らかである。これらの結果はすべてきわめて常識的であり、一般的な推測と一致する。

図-11 と同様の計算を口径 D 、断水時間 T の他の条件に関しても行い、これらの結果に基づいて作成したのが図-12～15 である。ここに、図-12、13 は最大給水量 600 l/人日、図-14、15 は 300 l/人日の場合である。すなわち、これらの図は、 $(l_v)_{opt}$ と $(C_T)_{min}$ との関係を D 、 N 、 P 、 T をパラメーターとして描いたもので、図-12、14 は普通鉄管、図-13、15 は石綿セメント管について示されている。これらの図より、 $(l_v)_{opt}$ は $D=100$ mm、 $T=2$ の場合と同様の傾向を示していることがわかる。一般的にみて、特に次の点は注意すべきである。
① $(l_v)_{opt}$ は地盤の N 値が小さいほど短かくなる。しかし、 T が長くなると N 値が $(l_v)_{opt}$ に及ぼす影響は小さくなる。
② T と $(l_v)_{opt}$ との関係は、 T が長くなると $(l_v)_{opt}$ は短かくなる。
③ 断水管路長さに沿う人口 P と $(l_v)_{opt}$ の関係については、想定される最大給水量によっても異なるが T が長い場合には P の $(l_v)_{opt}$ に与える影響は小さいが、 $T=2$ 時間という一般的なケースについては、その影響はきわめて大きい。
④ 口径 D および管種と $(l_v)_{opt}$ の関係については、 D が小さいほど、また、普通鉄管より石綿セメント管の方が $(l_v)_{opt}$ は短かくなっている。
 D と $(l_v)_{opt}$ に関するこの結果は、一見直観に反するようにみえるが、これは小口径管の破壊確率 P_F が大き

いことに起因した結果である。以上 ①～④ の結果もまたきわめて常識的なものである。

また、試算結果から得られた $(l_v)_{opt}$ は想定される最大給水量によっても異なるが T と P が大きい場合、現行の断水管路長さの平均値より短かく、この傾向は特に地盤の N 値と口径 D が小さいほど顕著である。一方、 T と P が小さい場合、 $(l_v)_{opt}$ は現行の断水管路長さの平均値より長くなり、この傾向は N 値および D が大きいほど著しい。これらのことから、 $(l_v)_{opt}$ は管種、地盤特性、人口密度および予想される最大給水量や、断水時間に依存して決定すべきことが明らかである。

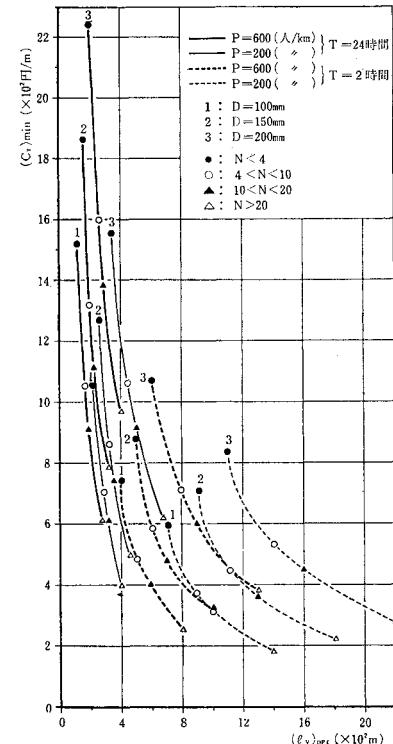


図-13 最大給水量 600 l/人日 における $(l_v)_{opt}$ と $(C_T)_{min}$ の関係（石綿セメント管）

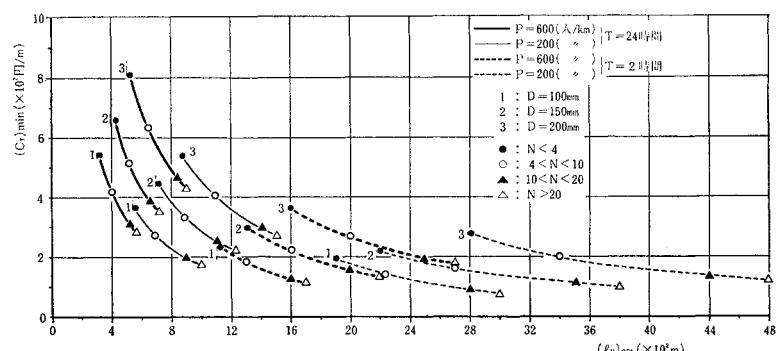


図-14 最大給水量 300 l/人日 における $(l_v)_{opt}$ と $(C_T)_{min}$ の関係（普通鉄管）

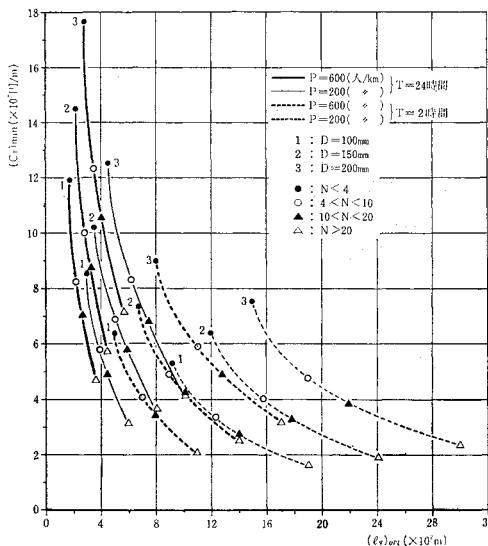


図-15 最大給水量 300 l./人/日における $(l_v)_{opt}$ と $(C_T)_{min}$ の関係 (石綿セメント管)

なお、單一直線管路モデルを対象とした本方法は論理的には樹枝状管路および網目状管路への適用も可能であるが、その場合には分岐点や交差点に必ずしも制水弁が設置されるとは限らない。すなわち、樹枝状管路や網目状管路への本方法を適用した場合には、分岐点や交差点の位置に関係なく、最適制水弁間隔となるような位置に制水弁を必要な数だけ設置すればよいことになる。しかし、現実的には分岐点や交差点に制水弁が設置されることが多い。これは、維持管理や事故時の制水弁位置の発見が容易であることなどに起因している。このような管理上の利点を特に重要視しなければならない場合には、できるだけ最適制水弁間隔に近い分岐点に制水弁を設置することになるのであろう。

以上の結果は、既設管をもとにした場合であるから、今後の新設管に関しては、実際には管の材質や技術の進歩によって、より長い $(l_v)_{opt}$ が期待されるが、これらに関する資料がそろわない間は既設管の結果をもとにし、制水弁の設置間隔の計画を進めるべきであろう。

7. む す び

本研究は、不測の突発事故に対する配水管の合理的な最適制水弁間隔に関して検討したもので、これを地盤特性と関連づけた管の破壊確率および経済的な評価をもとに追求した点に特徴がある。本研究で得られた主要な成果をまとめると以下のようである。

(1) 配水管の断水管路長さの実態を閉止制水弁数および地域の特性としての給水密度との関係から検討した結果、現行の断水管路長さには、地域の特性がまったく考慮されていないことが明らかとなった。

(2) 配水管の折損実態調査結果を分析整理し、配水管の折損を地盤との関係において検討し、地盤の N 値が折損に強く関係することを明らかにした。また、その結果を用いて配水管の破壊確率 P_F を地盤の N 値と関連づけて求めた。

(3) 配水管の最適制水弁間隔 $(l_v)_{opt}$ を検討するため、破壊確率を考慮した費用関数を適用し、配水管埋設に際する期待総費用 C_T を数値計算により求めた。そして、期待総費用最小に対する $(l_v)_{opt}$ を管種別、地盤特性、人口密度、最大給水量、断水時間との関係で検討した所、その結果は、軟弱地盤で人口の多い所ほど、また断水時間が長くなるほど、制水弁の間隔を短かくるべきであるというきわめて常識的なものとなった。

このようなことから、制水弁間隔は管種、地盤特性、人口密度および予想される最大給水量や断水時間に依存して決定すべきであることが明らかにされた。

終りに臨み、本研究を行うにあたり、貴重なデータを快く提供していただきました名古屋市水道局西尾武喜局長はじめ関係各位に対し深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 松尾 稔・堀内孝英：Marston-Spangler 理論の設計への適用に関する研究、土質工学会論文報告集、Vol. 15, No. 2, pp. 97～107, 1975.
- 2) 松尾 稔・堀内孝英：配水管の破裂に関する要因分析、土質工学会埋設管シンポジウム発表論文報告集, pp. 37～42, 1975.
- 3) 松尾 稔・堀内孝英：配水管の最適埋設深度の決定に関する研究、土質工学会論文報告集、Vol. 16, No. 2, pp. 77～90, 1976.
- 4) 松尾 稔・堀内孝英・西村 康：地盤の強さを考慮した配水管の最適設計に関する一考察、土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp. 121～122, 1978.
- 5) 松尾 稔・堀内孝英・小野内和雅：名古屋市域における埋設管の震害予測、土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp. 123～124, 1978.
- 6) 名古屋市水道局計画課：第1回メッシュ別給水量調査報告書、昭和47年8月分一, 1972.
- 7) 日本建築学会東海支部、土質工学会中部支部、名古屋地盤調査研究会編著：名古屋地盤図、コロナ社, 1969.
- 8) 小出 崇：配水管作業を考慮した配水管の組織方法(I)、一配水管作業とその作業性ー、水道協会雑誌, No. 468, pp. 15～31, 1973.
- 9) 小出 崇：配水管作業を考慮した配水管の組織方法(II)、一配水管の組織方法ー、水道協会雑誌, No. 470, pp. 18～38, 1973.
- 10) 小出 崇：配水管作業を考慮した配水管の組織方法(III)、一断水管路区域の設定(1)ー、水道協会雑誌, No. 472, pp. 19～38, 1974.
- 11) 小出 崇：配水管作業を考慮した配水管の組織方法(IV)、一断水管路区域の設定(2)ー、水道協会雑誌, No. 480, pp. 15～29, 1974.
- 12) 名古屋市水道局：水道工事共通仕様書, 1975.
- 13) 水道年鑑：第1部水道事業編、(3)水道行政、水道産業新聞社, pp. 22～38, 1975.

(1978.2.23・受付)