

はしがき

下水道の建設費のクォー割を占める管渠の建設費は都市によって相違った値を示している。建設費を決定する要因は様々に分類されるが 1. 計画段階(基本計画)において人為的に動かせる要因と 2. あらかじめ決まってしまう要因 とに分けて見る。1のなかに含まれるものは、計画水量・排除方式・排水区のとおり方など設計時点で決められるものである。又2に含まれるものは設計時点で変えられない、地形・勾配・道路状況 などと、それから工事に於ける条件である 土質・交通事情等がある。

限られた予算と与えられた条件のなかで最大の効果を上げるように設計条件を定め、ルート選定を行なうのが設計者の役割である。このために可変量である設計基本数値と工費との関係をとらえることが必要となってくる。このうち合流管の雨水量による工費の変動について比較がなされている¹⁾²⁾。

最近になって、下水道の事業目的が浸水対策から治水対策に移り出しており、分流式の採択が増加しているので、汚水管についてもこれらの検討が必要となってきた。

ここでは、排水区を標準的なものにおき変えて、設計条件を変えた場合に管径と工費にどの程度の影響を与えるか(感度分析)を容易に計算出来るシステムとその計算例を報告する。従って排水区の特長性は一切無視されることになる。

排水区の標準化の考え方

実際に管渠延長が算出される流量表の作成手順は まず排水区を小区画に割り、幹線への流集経路を決め、各区画毎の追加排水面積と管路延長を算出し、追加面積に単位流出量をかけてその区画割の流量を出して管径を決めている。従って追加面積と管渠延長を関係づけることができればあとは自動的に計算することが可能である。

追加面積(以降受持ち面積と呼ぶ)と管渠延長との関係を見つけるために、いくつかの排水区について調べたのが図-1である。

その算出方法は、まず1排水区の流量表から各区画割ごとに受持ち面積と管渠延長(管渠延長は追加ではなくて当該区画割のみ)のペアを出し、受持ち面積を1~2, 2~4, というように倍々の中で分類し、各分類区毎に管渠延長を合計した。次に各区画毎の総延長を排水区面積(総面積)で割って密度(ha 当り m)に変換し又各区画毎の m が違う のでその m で割って(微分形態への変換)グラフ化してある。例えば $400 ha$ の排水区で $64 ha \sim 128 ha$ まで受持つ区画の総延長が $2560 m$ あったとすると、まず密度に変換して $2560 m \div 400 ha = 6.4 m/ha$ となり $1 ha$ 当り $6.4 m$ の延長があることになる。次にこの区画の中である $64 = (128 - 64)$ で割って $0.1 m/ha$ という値を得る。

図-1は分流汚水管を含め5つの排水区について計算した。

図-1 受持面積と管渠延長(密度)

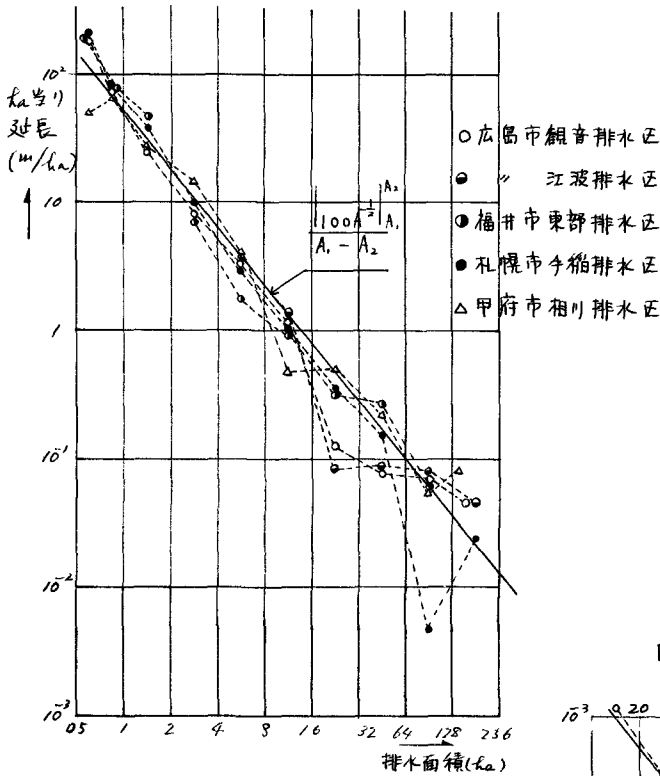


図-1より受持面積と管渠延長との間にほぼ直線的な関係が見出される。

調査した排水区は、甲府市が分流の排水管のほがは全て合流管で流出式は実験式を採用している。

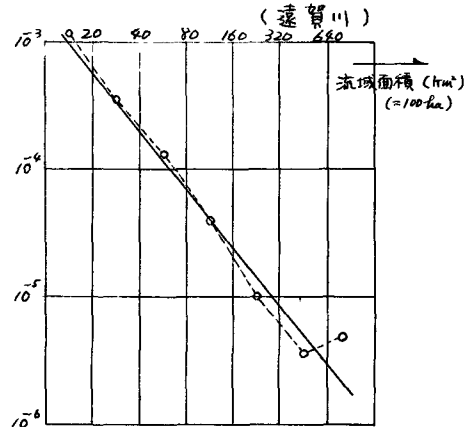
図-1だけでは資料が少なく統計処理を行って回帰式を求めるのは無理なので、図-1にもっとも近い簡単な式を求めた。

面積 A_1 から A_2 までの区域を受け持つ管渠延長 $l_{h, A_1 \sim A_2}$ は、次式

$$l_{h, A_1 \sim A_2} = 100(A_1^{-1/2} - A_2^{-1/2}) \quad \text{--- (1)}$$

ないしは

図-2 受持面積と河川延長



微分形である(2)式で示される。

$$\frac{dl_h}{dA} = 50 A^{-3/2} \quad \text{--- (2)}$$

ただし l --- 管渠密度 m/ha

A --- 受持面積 ha

下水道の排水区域は大きくても500ha程度であり、これより排水区がが大きくなった河川の流集形態を調べた

のが図-2である。図-2は流域が比較的まとまっていて流域図の入手でも遠賀川(流域面積は約1030km²)の流域を95の区画に分け、下水道の流量表と同じように区画毎の区画延長と遊加面積をはかりて求めたものである。ただしこの作業はとても時間がかかるので、まだ一河川しか行っていない。遠賀川に限る限り、(1)式は河川についても成り立つことを示している。

標準式の理論付け

比較的簡単な形である(1)、(2)式をモデル組み立てによる理論式で表わすことは可能と思われるが、つまりとしたものはできていない。不十分であるが現在考えている式をのべると。

まず 排水面積 A と 管渠延長 x の間に次式を仮定する

$$A = \alpha x^2 \quad \text{--- (3)}$$

α : 形状係数

(3)式より
$$\frac{dx}{dA} = \frac{1}{2\sqrt{\alpha}A} \quad \text{--- (4)}$$

大きな排水区 (面積 T_A) の中で枝線が流集して行くなかで (3) 式を考える。ある面積 A まで集ったヶ所は全体で T_A/A 個 ある訳であるが、もっと大きな面積と重なる所もあり重ならない個数を $\beta \cdot T_A/A$ 個と考える。(β は定数) 全排水区の中で、ある面積 A を受け持つ管渠延長は次式で示される。

$$\frac{dL_A}{dA} = \beta \frac{T_A}{A} \cdot \frac{dx}{dA} = \beta \frac{T_A}{2\sqrt{\alpha}} \cdot A^{-\frac{3}{2}} \quad \text{--- (5)}$$

これを l_A 当りの延長に直す。 $l_A = \frac{L_A}{T_A}$ とすると

$$\frac{dl_A}{dA} = \frac{\beta}{2\sqrt{\alpha}} \cdot A^{-\frac{3}{2}} \quad \text{--- (6)}$$

(6)式を積分して
$$l_{A_1, A_2} = \left| \frac{\beta}{\sqrt{\alpha}} A^{-\frac{1}{2}} \right|_{A_2}^{A_1} \quad \text{--- (7)}$$

(1)式より $\beta/\sqrt{\alpha} = 1$ となる。

しかしこの理論の基本式である(7)式の形状係数 α は 筆者の調べた 2, 3 の排水区では 0.5 ㎐ び約 0.5, 1 ㎐ では 0.35 となり、排水区が大きくなるにつれ 0.3 ~ 0.2 と下がり行く傾向であった。又後述の調査では $x = 0.5 A^{0.55}$ という式を得ている。

工費計算の手順

いままでのべたように受け持ち面積と管渠延長が関係づけられたので管径毎の最大受け持ち面積がわかればその管径の延長が計算できる。

ある設計条件が設定された場合の工費算出の手順は

- (1) 管径毎の平均最大流量の仮定
- (2) 設計条件による単位面積あたり流量算出
- (3) 管径毎の受け持ち排水面積算出
- (4) 管径毎の延長算出
- (5) 管径毎の単価の仮定
- (6) 工費の算出

の順に行われる。このうち (4) の手順に (1) 式が使われる。例えばある管径が 4 ㎐ から 16 ㎐ までの面積を受け持ったとするとその管渠は、

$$L(4, 16) = 100 \times (4^{-\frac{1}{2}} - 16^{-\frac{1}{2}}) = 100 \times (0.5 - 0.25)$$

$$= 25 \text{ m} / l_A \text{ の密度となる。}$$

ただし最小口径管については (1) 式が使えなく 道路密度より決められる。

管径別の密度と小さいものから $l_1, l_2, l_3 \dots$ とすると次式で求められる。

$$L = \text{道路密度} = \sum_{i=1}^n l_i \quad \text{----- (8)}$$

実際の計算

汚水管についての計算をすでにやっているのだから今回は合理式の合流管について計算を行って見た。合理式は設計が少し複雑なので精度を見るため実際の流量計算との比較を行なう必要があった。

たまたま東京都下水道局で実際にある排水区域について様々な降雨強度のもとで電算機による流量計算をしたことがあったのでこれと比較することにした。

電算機による流量表作成を行なったのは落合処理区の町正寺川排水区中2分区の区画番号 102 ~ 194 までの 25 区画の区域である。この区域は西武新宿線(新宿 - 川越)の井荻駅から少し新宿よりの線路に沿った所、線路をくぐる関係から 194 番まで一本にまとまっている。平均地価勾配は 7 ~ 8 % 程度と思われる。なお電算機による流量計算の詳細は 4) を参考にされた。

合理式で降雨強度を知るには流速時間が必要である。一方流速時間は管渠内の流下速度によって決まる。従って流量計算では 1) じめ流速を仮定し それによって流量表を作成した後又流速を修正することが行なわれている。しかし東京都では幹線については実際流速と合うまでフィードバックを行なうが、枝線管渠は仮定流速で 1 回の流量計算を行なうのみである。その分だけ流量には 2 割の余裕を見てある。対象とした区域には幹線がなく仮定流速は 1.5 m/sec としている。又流入時間は 5 分である。

これらの設計方針に合わせて流量と排水面積との関係を調べる必要がある。

合理式の流出量は次式で示される

$$Q = \frac{1}{360} C \cdot I \cdot A$$

今回は I がタルボット型で分毎に一定とした。

$$I = \frac{R \times 100}{t + 40}$$

ただし $R \dots$ 時間雨量 mm/hr

t は流入時間と流下時間とを合わせたものであるから t を流下時間におきかえて

$$I = \frac{R \times 100}{t + 45}$$

$$\text{従って} \quad Q = \frac{100 C R A}{360(t + 45)} \quad \text{----- (9)} \quad \text{となる。}$$

なお汚水量は無視することにする。

(9) 式より $t_{(0)}$ を A で置き換えることが必要となる。 t は次式で表わされる。

$$t_s = \frac{L}{60 \cdot v}$$

$L \dots$ 追加管渠延長 (m)

$v \dots$ 流速 (m/sec)

管渠延長と排水面積との関係は 3 都市の例について調べた。(東京都新河岸排水区の一部、三鷹市馬山排水区(1.2 分区)、米子市中央排水区(1 分区))

この結果 (10) 式を得た。

$$L = 50 A^{0.55} \dots (10)$$

(10)式はモデルと矛盾している。

(10)式と $v = 1.5 \text{ m/sec}$ より

$$t = \frac{50}{1.5 \times 60} A^{0.55} = \frac{5}{9} A^{0.55}$$

従って(9)式は(11)式となる。

$$Q = \frac{1}{3.6} \cdot \frac{C \cdot R \cdot A}{\frac{5}{9} A^{0.55} + 81} = \frac{C \cdot R}{2} \cdot \frac{A}{A^{0.55} + 81} = \frac{C \cdot R}{200} \cdot \frac{A}{A^{0.55} + 81} \dots (11)$$

このようにして面積Aと流量Qとの関係が握れたので次に管渠処長の算出を行なう。

比較の対象としたのは、表-1のA、B、C

の設計数値についてである。

表-1 よりもっとも大きな流出量の比較もしたが、たが計算機の管径の記憶容量の関係でCより大なる場合は計算がオーバーフローとなって比較できなかつた。

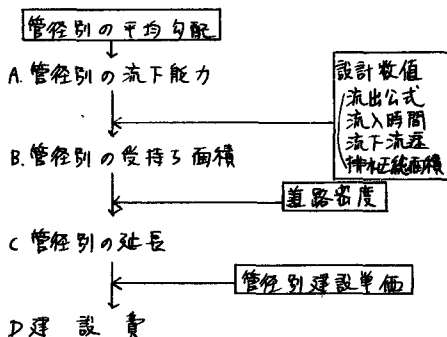
表-1 設計数値のとり方

区 分	A	B	C
時間雨量 P_{mm}	30	30	50
降雨強度式	$\frac{3000}{t+40}$	$\frac{3000}{t+40}$	$\frac{5000}{t+40}$
流出係数 C	0.2	0.4	0.5
換算時間雨量*1 $1.2 \times R \times C \text{ mm}$	7.2	14.4	30

*1 2割の余裕を見てある

これらの設計条件のもとでの計算手順を図-3で示す。又表-1のBの場合の計算表は表-2で示される。

図-3 計算の手順



計算手順の説明

図-3で計算手順と与えべき設計条件が示されている。この順序に従って説明する。

A 管径別の流下能力の算出

まず各々の管径の受持つべき流量を求めなければならぬ。表-2では電算計算の流量表で使われている勾配をもとに決め

たが本来はこの種データが全くないので計算を行なうのだから別の算出表が必要である。そこで算出の目安として図-4を考えた。図-4は管径と管勾配と流速との関係を示した図で、横軸は管径、縦軸は勾配、斜線は等しい流速となる勾配の点を結んだ線である。図-4は平均流速を求める時にも便利である。実際の平均勾配の分布はAD線に収められた範囲内にある。地形の急なものはD線に、又平坦なものほどD線に接近することはわかるが、ある地形についてどのような分布をするのがはけより換わぬ。経験的には、図-4のA、B、C、D線のうちどのがとめておけばよいといえない。よりデータを積み重ねて妥当な線を出す必要がある。

平均勾配が決まると流量公式より流下能力が求められる。

表-2 計 算 表 (B の場合)

1	管径	2	平均间距	3	流量 Q_i	4	$\alpha \times Q_i$	5	受持面积 A_i	6	$K_i = \frac{100}{A_i}$	7	总延长度 $L_i = (n_i - 1) \times L_i$	8	总延长度 $L_i = 25 \times L_i$	9	比降率 $\frac{L_i}{L_i}$	10	建设费 $C_i = L_i \times C_i$	11	电算计算总长
	mm	‰	%acc		ha							m/ha	m	m							
1	250	8.0	0.0498	0.692	0.570	132.45						2764	0.299	880.3					3162		
2	300	6.5	0.0763	1.032	0.85	108.47						23.98	600	0.329	197.4				526		
3	350	5.4	0.1025	1.647	1.19	91.67						16.80	920	0.354	148.7				262		
4	400	4.6	0.1399	1.915	1.59	79.31						12.36	380	0.387	119.6				304		
5	450	4.1	0.1997	2.496	2.05	69.84						9.97	237	0.432	102.4				612		
6	500	3.8	0.2700	3.190	2.64	61.55						8.29	207	0.462	95.6				52		
7	600	3.1	0.361	4.760	4.00	50.00						11.55	289	0.534	154.3				275		
8	700	2.65	0.480	6.67	5.60	42.26						7.74	194	0.636	123.4				0		
9	800	2.30	0.642	8.92	7.50	36.52						5.74	146	0.727	104.7				131		
10	900	2.05	0.820	11.53	9.70	32.11						4.61	110	0.861	94.7				72		
11	1000	1.80	1.026	16.39	12.4	28.60						3.71	93	1.000	93.0				61		
12	1100	1.65	1.280	19.78	15.3	25.57						2.83	71	1.157	82.1				89		
13	1200	1.50	1.582	21.62	18.5	23.25						2.32	58	1.328	77.0				158		
14	1350	1.35	2.000	27.78	24.2	20.33						2.92	73	1.573	116.8				53		
15	1500	1.20	2.503	34.76	25.0 ^{*4}	20.00						0.33	8	1.855	14.8				0		
16	1650	1.09	3.080											2.100							
17	1800	1.00	3.712											2.652							
18	計												5757		2403				5757		

*5 $C=0.4$ $R=30 \text{ mm/hr}$

1.2. c $R = 14.4 \text{ mm/hr}$

$$\alpha = \frac{200}{C \cdot R} = 13.889$$

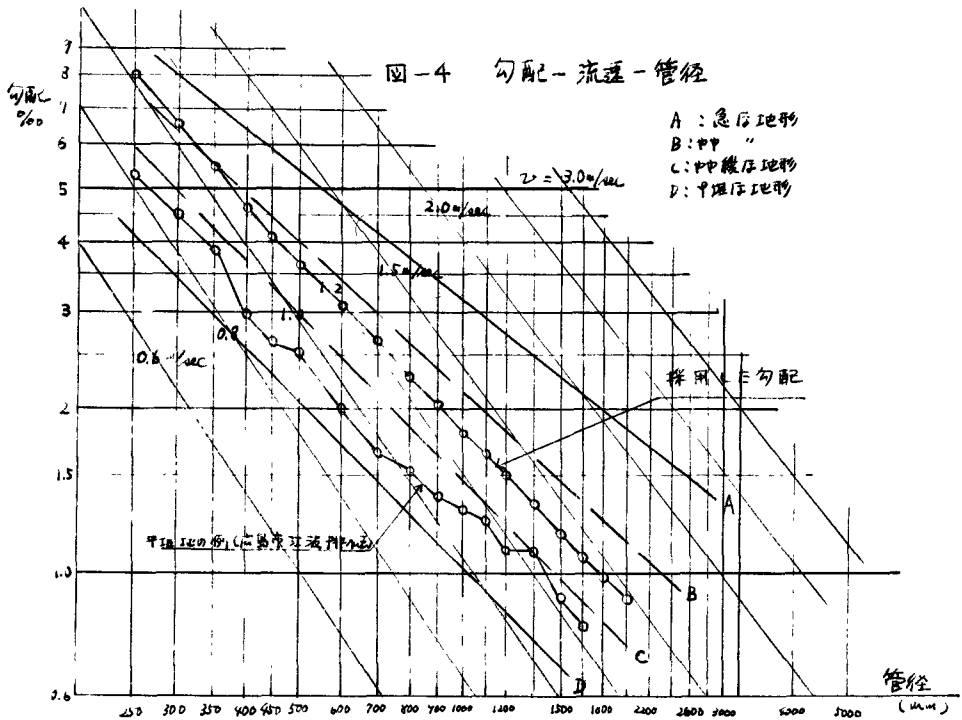
$$\alpha \times Q_i = \frac{100 A_i}{A_i + 81}$$

*1 あらかじめ A と $100A/A^{255}+81$ のグラフを作成しておいた

*2 0.1000mm管 1mを 1.000としている。この数値は各都市の五年計画単価をもとに決めた。

$$*3 \quad 5757 - \sum_{i=2}^{15} Li$$

*4 排水口の高さ(25cm)で決まる



B 管径別の受持ち面積算出

(11) 式により流量と受持ち面積との関係が求まっているので管径別の受持ち面積の算出を行なう。式が面倒な形をしているので表-2では系統を2段階に分けた。(11)式を変型して

$$Q \times \frac{200}{C \cdot R} = \frac{A_i}{A_{0.35+8.1}} \quad \dots \dots (12)$$

(11)式の左辺は定数計算で求められる。別にAと(12)式の右辺との関係を図ラフ化して置いて(11)式の左辺が算出されるとグラフからAが読みとれるようにしてある。このようにあざあざ系統を2通りに分けたのはC×Rを幾通りかに変化させても表-2の計算が簡単に行えるようにしてあるためである。このようにして管径別の受持ち面積が求められた。ただし排水径の最大値が25φなので表-2でφ1500mm管は25φで打ち切っている。

C 管径別の延長算出

管径別の受持ち面積が決まると(1)式を使ってφ当りの延長が算出できる。表-2では6と7の系統がそうである。ただし最小口径管については(1)式から算出できなくて道路密度(管渠密度 m/ha)より決まってくる。道路密度は下水道設計では既定の要素としてあまり重く考えられていたが、実際は流出公式よりも大きく建設費を左右する要素である。その値は150~300 m/haとなる範囲にあり、平均は200 m/haくらいである。

正画整理事業などによって市街地が整備されると高い数値(250m~300m/ha 高級住宅地でも)を示す。

なお管径別延長を出すためには排水区域面積をかける必要がある。

D 建設費の算出

ここで求められた管渠延長に単価をかけて総建設費を求める。建設単価は工事条件によって決まることが多い。またその原因となるのは地盤と市街化の程度である。表-2では全国平均単価をもとにしてφ1000mm管の1m当り単価を1とした指数におきかえている。

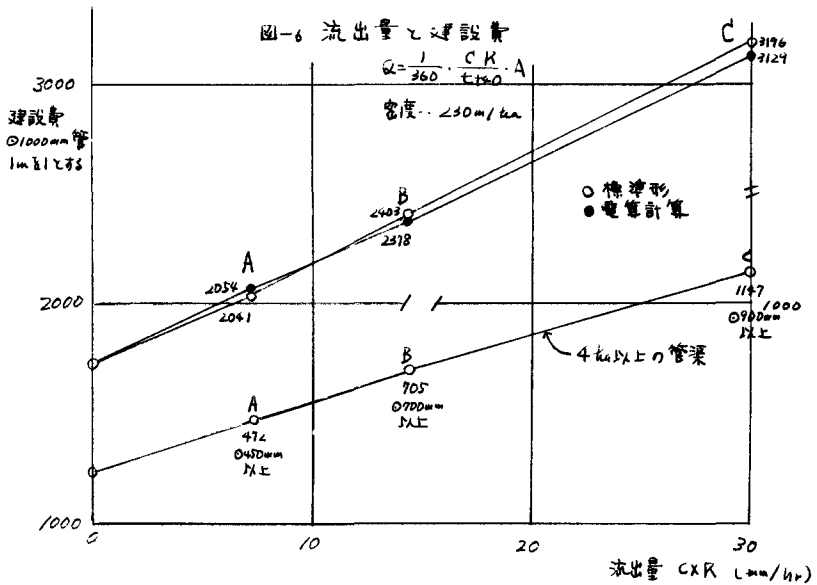
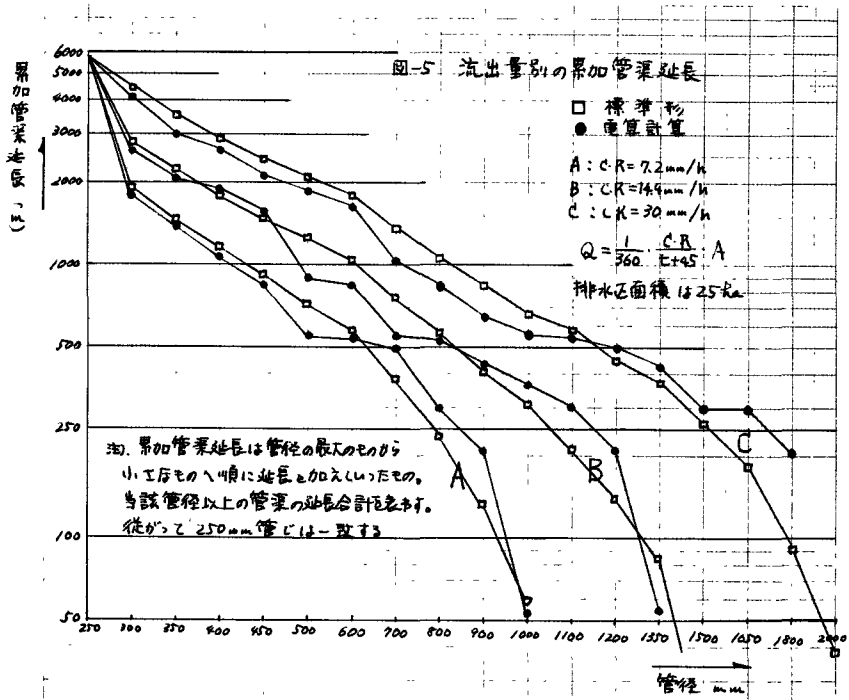
以上のようにして計算を行えばよい。ただし表-2は卓上計算機による計算に便利なるように作成してある。

計算結果

図-5では管渠延長を最大なものから累積した形の比較を行なっている。AとCもBと同じ計算系統で求めたものである。当該管径以上の管径の延長の累積値であるのでφ250mm管では管渠総延長と等しい。又図-5でBとCの場合、標準形が電算計算より1ランク上の管径まで採択している。

図-6は流出量と建設費の関係を示している。一般的に設計流量と建設費は直線関係にあるようである。流出量の差は計算過程で管径に転化し工費に移される。つまり2段の変換を受けるわけであるが直線関係になるという理由は不明である。

図-6で電算計算の方が勾配が少しゆるくなる場合標準形と少しずれている。この理由は平均勾配の決定を管径毎に行なったためであると思われる。平均勾配は地形によって決まるものであり、あ



る排水面積を受け持つ管は一般的に管径の大小に関わらず勾配は一定となる。しかしその差のあらわれ方は大きく影響を与えるものではないし、又流量が何倍も違う場合の比較検討を行なう場合もそう大きくないと考えられるのでこの欠点に対する土したる考慮はいらないのではないがと思われる。

幹線管渠は先行投資額が大きいと常に問題になるが、図-6ではこの排水正として幹線と思われる4m以上の管についての工費比較も行っている。ただしグラフでは工費を1000だけずらしている。

4m以上の管渠というと、Aは $\phi 450\text{mm}$ 、Bは $\phi 700\text{mm}$ 、Cは $\phi 900\text{mm}$ 以上の管径となる。

図-6で流量が0の時も工費が入っているのは全部 $\phi 250\text{mm}$ 管になるからである。

流量と面積の関係を導き出すのは流れ管では一律なので容易であるが、雨水は流速による変動と大規模垂直作用が働らくので系統が複雑になった。しかも算出に重負をふいているため相当あらわな方法と思われる。

比較の対象となった流量計算法は、仮定流速でとのまま決定するというフィードバックを持たない計算法ではあったが、修正計算の有無による差はあまりないように思える。

今後の問題点

今後の方向としては排水正の特殊性の加味や函数におまかえることによる簡素化などが考えられる。

これは排水正を幹線と枝線に分け、幹線は実延長で計算して特性を考慮すること、現在の方式が管径別を主体とし、函数で表わされている排水面積と管渠延長の関係をわざわざばらしたりしているが管径別をやめて管径別の工事単価を函数形にすることにより排水面積と工事単価が函数関係になるので総建設費が一つの函数で表わされる等である。

又基礎データについては殆んど全ての点で不足している。しかしこのシステムは実用化されるのであればより高度の開発も基礎データの積み上げも無意味である。実際の基本計画で問題となる事項を考慮する手段としてこの手法を考えたのであるが、筆者は直接設計に携わっていないので特に設計関係者の御批判、御意見を是非ともお寄せ下さるようお願いする次第である。

なお資料を提供して頂戴した東京都下水道局企画課の藤田昌一氏やその他の方々に深く感謝いたします。

- 1) 西堀：中小都市下水道築造事業の経済性の検討
- 2) 牧野：下水道の雨水流出量算定法、第3回下水道ゼミナールテキスト
- 3) 佐藤：下水道計画の経済性に関する考察、下水道協会誌 1966-78月号
- 4) 木幡 藤田：電子計算機による管渠の自動設計 下水道協会誌 1968-8月号