

1. はじめに

下水道管きよ計画は、与えられた条件のもとで、管きよの大きさと地下空間への配置を決定することを目的としている。下水道管きよは、地下埋設物として比較的大きな断面を必要とし、さらに、自然流下を基本としているところから、計画の巧拙による経費への影響も大きい。したがって、電算機利用による効用がかなり期待できる。ここでは、管きよ計画・設計に電算機を利用するにあたっての課題を示し、現在の利用水準を、例をあげて説明するものとする。

2. 電算機利用の目的

計画・設計に電算機を導入するにあたっての目的として、次の3段階があると考ええる。①省力化、②高度化、③最適化、である。省力化は、現行の設計方式を電算機におきかえることであり、高度化は、変数を増加させたり、精度を増したり、評価項目を追加したりすることである。また、最適化は、最適な設計変数を決定できるような数学モデルを確立することである。

従来の下水道管きよ計画は、熟練設計者の経験と勘に頼っていた。したがって、電算化もまた、数量化しにくい経験と勘の数量化から始まったといえる。そして現在では、①の省力化を、ほぼ満足させながら、②の高度化への試みがなされている段階といえよう。一方、③の最適化については、主として、研究者による数学モデルの開発が続けられているが、①、②との結合には至っていない。

3. 管きよ計画の分類

管きよ計画を分類すると、次の項目があげられる。

平面計画と縦断面計画 平面計画は、地形条件等を考慮しながら、ルート(レイアウト)を決定するもので、管きよは、処理場を終端として、樹枝状に配置される。また、縦断面計画は、深さ方向の地下空間の配置を決めるもので、すでに多くの電算機モデル化が試みられている。一般に、縦断面計画は、平面計画の下位計画として位置づけられることが多く、両者を同時に考慮した計画手法は、あまり開発されていない。(図-1、図-2 に例を示す)

汚水管計画と雨水管計画 汚水管は、処理場を終端とするものであるが、雨水管は、途中での放流を前提としたものである。流域下水道の幹線を除けば、一般に雨水管の断面は、汚水管のそれより、はるかに大きく、そのために、雨水管を優先して配置することが多い。

ニュータウンと既市街地 新規に地下空間計画を行なう場合には、下水道を優先的に配置することは可能であるが、既市街地の場合には、他の地下施設に屋れて建設されるため、制約条件がきわめて大きくなり、また複雑になるので、熟練者の力に頼ることになってしまっている。

以上のなかで、省力化、および高度化が進んでいる部分は、汚水管の縦断面に関する新規計画である。平面計画は、パターン認識のモデル化に困難があり、また、雨水管では、流下時間の仮定による繰返し計算が必要となる。

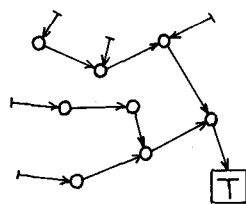


図-1 平面図

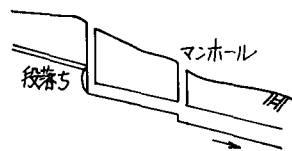


図-2 縦断面図

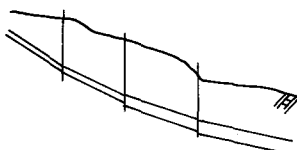


図-3 管きよの基本的プロファイル

4. 縦断面の設計方式と制約条件

この設計は、与えられた流量に対する管きよの管径、および位置（勾配、土被り、管接合方法）を決定することである。

水理的条件 最大流速(V_{max})、最小流速(V_{min})、管(管径 D)の上下流(上流を $N-1$ 、下流を N とする)関係などの制約条件があり、次のように表わせる。 $V_{min} \leq V_{N-1} \leq V_N \leq V_{max}$; (1), $D_{N-1} \leq D_N$; (2) この制約から、実際には、管きよ系のプロフィールが図-3に示すような下に凸の配置になる。

その他の条件 地形、地質、交通、既設の地下埋設物、下流端土かぶり、など。とくに、最近では、交通問題と関わってツールド工法などが用いられ、計画全体に影響する場合も多い。

5. 省力化、高度化の実用プログラム

縦断設計に関しては、すでに各社において、独自のプログラムが用意され、実用に供されはじめている。その目的は、まず、省力化であり、熟練技術者の負担軽減であるが、一方で、内容を高度化することによって、実質的な最適設計へと近づける努力も払われている。縦断設計における現在の到達段階と将来の目標についてまとめたものが表-1である。省力化として、基本的な入力資料の作成と最終成果品の図面が対象となっており、面積、距離などの算定を除いて、ほぼ実用化できている。プロッターによって図化された例を図-4に示す。高度化としては、満管流速を前提とする設計から、実流速を用いるものへ変わりつつある。設計の校となる縦断面決定の評価については、経験にもとづく設計思想の組み込みや、不確定部分のシミュレーションによる補充が行なわれて、経費の安い断面の決定法を確立することであろう。したがって、実用的に最適な断面を、短い計算時間で得られることが、プログラムの優劣を判定する基準となる。

このようなアプローチでの実用化が、最適モデルより優先される理由は、次によると考えられる。

- (1) 水量予測や施工に、かなりの誤差があり、精密な最適化モデルにはじまない。
- (2) 管径が、50mm、100mmなどを刻みとする離散的な規格となっており、精密な配置と整合しない。
- (3) 既存市街地の場合には、制約条件が多くて、配置に対する選択の幅がないことが多い。

表-1 縦断面設計の電算化

項 目	現在の到達段階	将来の目標
ルート処理場位置	前提となっている(判断)	平面計画との一体化
区分面積距離等	手作業-プラキータ	省 力 化 計 算 の 自 動 化
発生水量の算定	電算機による積算	
管きよの流速	満管流速基準が中心	高 度 化 実流速による計算
雨水管と合流管	流下時間修正と流速流量	
段落ち 管接合	プログラム化確立	
縦断面決定の 評価項目	1. できるだけ残す 2. 多くのケースについて試算し、総掘削量で評価	高 度 化 試行回数の増加 シミュレーションによる設計理の確立
製 図	自動化	高 度 化 高速度化、ガス導入

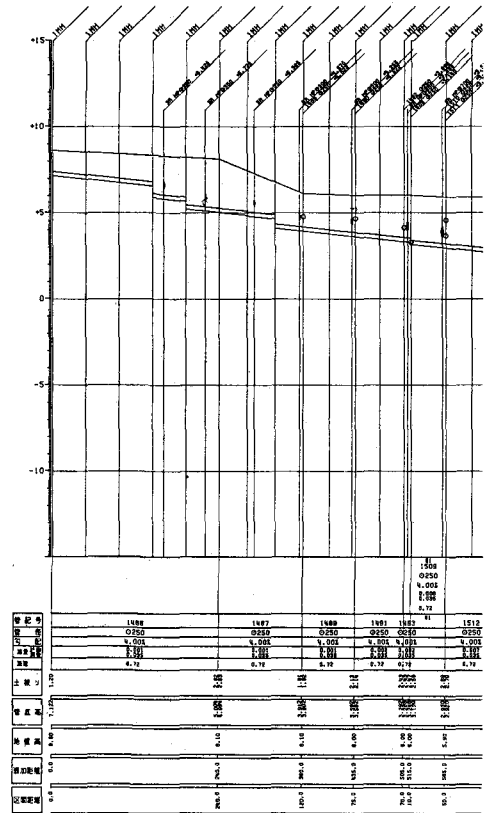


図-4 製図例(A社提供)

6. 最適化モデルとその応用

(1) 最近の研究 平面および縦断面の最適化モデルについては、ダイナミックプログラミング(D.P.)の導入を中心として、研究が続けられている。これらは、数学モデルの発展に重点があり、実用化には至っていない。周知の通り、D.P.モデルは、記憶量の大きさと、計算時間のかかりすぎることが、常に障害となっており、何らかの近似をしない限り、計算コストはひきあわない。このため、精度をおとしたり、縦断面のみに限ったり、計算方法を近似化したりして、高度化のモデルと区別しがたいものが多い。

これらの研究のなかで、とくに注目されるのは、平面計画に重点をおいたLiebmanの研究である。ここでは、D.P.は用いられていないが、ヒューリスティックな方法で、平面のレイアウトを決定する方法を提案している。ただ、計算を簡略化するため、縦断面での最適化は、はかられていない。さらに、注目されるのは、縦断面および平面の同時考慮によるD.P.の適用を示したArgamanの研究²⁾である。ここでは、ノードからの流出方向の候補が、限定されてはいるが、3次元のD.P.モデルとなっている。しかしながら、記憶と計算時間の制約から簡単な事例しか示されていない。

(2) 3次元最適化モデル³⁾ 区間Nの管の上端の掘削深さを h 、管勾配を s とすると、管の状態は、 (h, s) と2次元表示をすることができる。いま、建設費用を g とし、区間Nの費用を、 $g_N(h_N, s_N)$ とあらわすと、上流端から区間(N-1)までの最適費用を $f_N(h_N, s_N)$ として、次のような再帰的關係式が成立する。

$$f_N(h_N, s_N) = \min_{\substack{h_{N-1} \leq H_0 \\ S_0 \leq s_{N-1} \leq S_d}} [g_{N-1}(h_{N-1}, s_{N-1}) + f_{N-1}(h_{N-1}, s_{N-1})] \quad (3)$$

ここで、管延長を l_N とすると、 $H_0 = h_N - l_{N-1} \cdot s_{N-1} \cdots (4)$ 、 $S_0 = (Q_N / Q_{N-1})^2 \cdot s_{N-1} \cdots (5)$ 、 $S_d = (R_N / R_{N-1})^2 \cdot s_{N-1} \cdots (6)$ となる。また、(3)~(6)式は、合流管や、ポンプ設備のある場合には

一般性を失わない。

以上の縦断面モデルに、Liebmanの提案した、ヒューリスティックな平面モデルを併用して3次元最適化モデルとする。

(3) 計画因子の不確実性とその評価

ここでは、上記のモデルを用いて、計画因子の变化による最適レイアウトや費用の变化をみてみる。

図-5のような、25個のノードをもつモデル排水区を想定し、その地形を、平均勾配、および単調、複雑を考慮して、12通りのパターンを設定した。計算のための初期ルートは、設計者の判断で定めた。

パターンおよび最適値を表-2に示す。緩勾配ほど、また、複雑な地形ほど、初期値が改良されており、このモデルの有用性が示された。

表-3は、交通等の道路条件によって、地域の一部の建設費用が高くなる場合での

① ② ③ ④ ⑤

⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩

⑪ ⑫ ⑬ ⑭ ⑮

⑯ ⑰ ⑱ ⑲ ⑳

㉑ ㉒ ㉓ ㉔ ㉕

図-5 Plane profile (26 nodes)

表-2 計算例(ケース1~ケース5略)

ケース	地形	勾配名	平均勾配	偏差勾配(%)	費用(百万円)		減少率(%)	管変更回数
					初期設定	最適解		
5	単調	急勾配	6.0	2.0	174.0	173.3	0.4	4
6	単調	準急勾配	3.0	1.0	176.4	174.8	0.9	6
7	単調	準緩勾配	1.0	0.33	182.1	180.1	1.1	5
8	単調	緩勾配	0.5	0.17	193.6	186.2	4.0	7
9	複雑	急勾配	6.0	4.0	173.9	173.5	0.25	2
10	複雑	準急勾配	3.0	2.0	175.5	175.2	0.18	3
11	複雑	準緩勾配	1.0	0.66	189.6	180.7	5.0	6
12	複雑	緩勾配	0.5	0.33	215.1	200.4	7.3	8

表-3 費用増の影響

ケース	地形・勾配	費用倍率	費用(百万円)		減少率(%)	管変更回数(回)	基準ルートに対する費用
			初期設定	最適解			
6	単調 準急勾配	1.0	176.4	174.8	0.90	6	—
6'		2.0	197.6	194.9	1.36	9	195.1
6''		5.0	261.4	255.4	2.27	9	256.0
10	複雑 準急勾配	1.0	175.5	175.2	0.18	3	—
10'		2.0	196.5	195.5	0.54	7	196.3
10''		5.0	259.4	256.2	1.27	11	259.4

結果を示したものである。中央部分の費用増(2倍, 5倍)の場合のケース6, 10についてのみ示したが, 5倍にもなると地形より支配的となる。

表-4は, 図-6に示すように, AまたはB地区の発生量を60%増した場合の結果であるが, 全体に与える影響は, きわめて少ないことがわかった。

表-5は, 計画因子の影響について, 直交表を用いた総合的に検討をするために, 因子の内容と水準を示したものである。因子は, 地形, 流量等について, 変動を含めた10因子(A~J)とし, 主効果分析を行なったところ, 費用への寄与率は, Hが54%, Bが16%, Dが13%となって, 「地形の複雑さ」と「下流側の勾配」の影響の大きさを裏付けた。

(4) 計画手順の不確定性とその評価 現行の計画手順と, 最適化モデルと対比することによって, 現在の技術と評価できるばかりでなく, 最適化モデル自身の評価も可能となる。ここでは, 計画密度, 平面計画, 縦断計画, 幹支線計画をとりあげた。計画密度のうち, 土被り刻みについては, 表-6に示すが, 緩やかな地形での安定性が悪い。平面密度を減るときには, 縦断面の土被り刻みも減る必要がある。縦断計画については, 表-7に示すが, 急勾配で複雑な地形の効果が大きく, 緩やかな地形での効果が大きい平面計画と対比的である。表-8は幹支線計画の結果であるが, 支線の影響は小さく, 幹線のための最適化で十分と思われる。

<参考文献>

- 1) Liebman, J.C.; ASCE, Vol. 93, No. SA4, 1967
- 2) Argaman, Y. et.al; ASCE, Vol. 99, No. EE5, 1973
- 3) 山田 淳; 工命館大学理工学研究所紀要, No. 27, No. 28

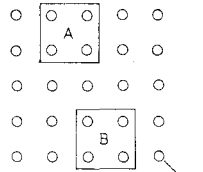


図-6 Influence of unbalanced flowrate (The load of block A or B is much)

表-6 土被り刻みによる影響

ケース	費用 (百円)			変更管数	平均勾配 (%)	σ (m)
	(a) DI=0.25m	(b) DI=0.125m	(a)-(b) (m)			
13	174.75	174.65	0.10	0	3.4	0.38
14	177.05	176.39	0.66	8	2.2	0.38
15	188.40	188.03	0.37	1	3.6	2.46

σ : 地表面変化(標準偏差) DI: 土被り刻み

表-4 発生活水量の不均等の影響

地形	費用 (百円)		
	標準タイプ	A タイプ	B タイプ
1	194.9	191.4	191.7
2	177.3	178.7	176.7
3	174.9	175.8	174.5
4	177.9	179.5	177.1

表-7 縦断計画方式による影響

ケース	(百円)		
	現行の方式	平面最適化	減少率 (%)
5	203	174	14.3
6	181	176	2.8
7	183	181	1.1
8	193	190	1.6
9	209	174	16.7
10	180	176	2.2
11	188	186	1.1
12	210	208	1.0

表-5 因子と水準

	因子の内容	水準 1	水準 2
A	X 方向上流側の勾配	0.5%	2.0%
B	Z 方向下流側の勾配	0.5%	2.0%
C	Y 方向上流側の勾配	0.5%	2.0%
D	Y 方向下流側の勾配	0.5%	2.0%
E	流量の割増し係数	1.0	1.2
F	費用の割増し係数	1.0	1.2
G	流量変動 (σ_q)	0.0	0.2Q
H	地盤高変動 (σ_H)	0.0	1.0 m
I	費用変動 (σ_c)	0.0	0.1C
J	流出土被り	4.0 m	2.0 m

表-8 幹・支線計画

	ケース	費用増加率 (%)	平均土被り水準	
			幹線	支線
現行	6	0.13	1.53	1.10
	10	0.07	1.50	1.00
3次元モデル	6	0.04	1.31	1.00
	10	0.27	1.53	1.00