

(株) 日本水道コンサルタント 正員 小泉 明
 , 正員 萩原良巳
 , 正員 辻本善博

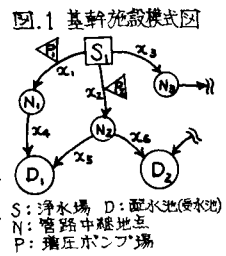
1. はじめに

広域な地域を対象とした広域水道施設基本計画に際して、新設あるいは増設する浄水場、送水管路、増圧ポンプ場等の基幹施設の位置選定、並びにその規模決定は重要な計画課題となる。このとき、各施設の位置および規模の組み合わせにより基幹施設の計画案は無数に考えられ、たとえば経済的評価による施設の位置並びに規模の決定が必要となる。

本稿では、浄水場の位置および送水管ルート候補が定まった後の施設規模決定問題に注目し、維持管理費も含めた意味での広域水道施設トータルコストを最小とするような施設規模決定について考察する。すなわち、広域圏における市町村別計画給水量充足条件、各地点での流量連続条件、およびエネルギー収支条件を制約とし、コスト最小という評価にもとづいて施設規模の決定を行なうものである。以下、2. では施設規模決定モデルの定式化を行ない、3. では具体的適用例として既設を含む場合のケーススタディを示すこととする。

2. モデルの定式化

本稿では、現実の基幹施設を図.1のように模式化して把えることとする。いま、建設予定の浄水場を $S_1 \sim S_k$ 、配水池(受水池)を $D_1 \sim D_r$ 、および中継点を $N_1 \sim N_j$ とし、それらを結ぶ送水管路に番号を付け $x_1 \sim x_n$ とする。まず、第1段階として、増圧ポンプ設置の有無があらかじめ設定されたものとして、各配水池での計画給水量充足並びに各地点での流量連続を制約条件とし、新設施設総費用を評価関数としたときの各管路流量決定問題をモデル化する。各費用関数は過去のいくつかの実施例により以下のように設定する。



① 管工率費 $f(10^3 \text{円/km})$: $f = a_1 + b_1 R + c_1 R^2$, ここで $R(\text{mm})$ は管径, a_1, b_1, c_1 は係数である。 …… (1)

② 浄水場建設費 $\varphi(10^3 \text{円})$: $\varphi = a_2 + b_2 S^{c_2}$, ここで $S(\text{m}^3/\text{日})$ は浄水場規模である。 …… (2)

③ 浄水場維持管理費 $\psi(10^3 \text{円})$: $\psi = A \cdot S \cdot T = (a_3 + b_3 S^{c_3}) \cdot S \cdot T$ …… (3)

(3)式で、 $A(10^3 \text{円/年})$ は年間維持管理費、 $T(\text{年})$ は浄水場耐用年数である。なお、維持管理費としては、人件費、事務費、動力費、薬品費、修繕費および汚泥処理費の合計としている。

④ 増圧ポンプ設置費 $U(10^3 \text{円})$: $U = 4 \cdot C = 4 \cdot a_4 \cdot W$, ここで $C(10^3 \text{円})$ は増圧ポンプ1台当り設置費 …… (4)
 $W(\text{KW})$ はポンプ出力を示す。またポンプの耐用年数を浄水場の約1/2と仮定し、さらに予備ポンプも考慮している。

⑤ 増圧ポンプ電力費 $V(10^3 \text{円/年})$: $V = Y \cdot T = a_5 \cdot T \cdot W$, ここで $Y(10^3 \text{円/年})$ は年間ポンプ電力費である。 …… (5)

つぎに、管径 $R(\text{mm})$ と流速係数 F 、管路流量 $\alpha(\text{m}^3/\text{日})$ 、および動水勾配 $\theta(\%)$ との関係はHazen-Williams式より
 $R = 1625.8 \cdot F^{-0.38} \theta^{-0.205} \{ \alpha / (3600 \cdot 24) \}^{0.38}$ となる。なお $F = 130$ としている。 …… (6)

また、ポンプ出力 $W(\text{KW})$ は、流量 $\alpha(\text{m}^3/\text{日})$ とポンプ揚程 $P(\text{m})$ およびポンプ効率 η (ここでは0.7)の関数とし、
 $W = 0.163 / (24 \cdot 60) \cdot P \cdot \alpha / \eta$ と設定する。 …… (7)

以上の費用関数並びに関係式をもとに、本モデルの評価関数としては次式とし、これを最小とする。

$Z = \sum_{m=1}^n f_m \cdot L_m + \sum_{k=1}^r (\varphi_k + \psi_k) + \sum_{m=1}^j \delta_m \cdot (U_m + V_m)$ …… (8)

ここで L_m は m 管路の長さ(Km)を示し、 δ_m (ポンプ設置の有無)は m 管路の地盤高低差 $H_m(\text{m})$ と長さ $L_m(\text{Km})$ 、および設定動水勾配 θ_m とにより決定される。 $\delta_m = 1$ (if $\theta_m L_m - H_m > 0$) or $\delta_m = 0$ …… (9)

以上の非線形計画モデル(N.P)の解として得られる各管路流量は、流量連続式を満たしているが、流体力学

的意味でのエネルギー保存則を満たしているとはいえず、また(9)式により設定したポンプ設置の有無が適当でない場合も考えられる。さらに、管径 R_m は実際には規格管となることから、上記モデルの解の修正が必要となる。

そこで、ホ2段階として、最適規格管径の決定、ポンプ設置の有無およびポンプ揚程の決定を以下のように行なうこととする。まず、上記のN.P.Eモデルの最適管路流量 x_m を用いて規格管径 \tilde{R}_m および動水勾配 $\tilde{\theta}_m$ を求める。そして、各管路 m について(9)式の判定を行ない、ポンプ設置の有無 $\tilde{\delta}_m$ を再決定する。つづいて各管路 m について、その両端地点の有効水頭 E_{ms} 、 E_{mt} を導入し、エネルギー式を以下のように設定する。

$$E_{ms} - E_{mt} + H_m + \tilde{\delta}_m \cdot P_m = \tilde{\theta}_m \cdot L_m, \quad (m=1, 2, \dots, M) \quad \dots\dots (4)$$

このエネルギー式を制約条件とし、評価関数としては前述のポンプ設置費 U と電力費 V の和を採用し、これを最小にすることとする。

$$\tilde{Z}_P = \sum_{m=1}^M \tilde{\delta}_m (U_m + V_m) \quad \dots\dots (5)$$

(5)式の評価関数は、(4)(5)式で設定した関数により、ポンプ揚程 P_m の線形一次結合となるため、この決定問題は線形計画モデル(L.P)として定式化される。このL.Pモデルを解くことにより、エネルギー保存則を満たしポンプ費用を最小にするポンプ揚程 P_m と各地点の有効水頭 E が決定される。

図2 基幹施設例

3. 具体的適用例

2.で示したN.PとL.Pによる2階層の施設規模決定モデルを用いて、図2に示す基幹施設規模の決定を行なうこととする。いま、浄水場 S_1 および送水管路 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_6 は既設とし、その他の浄水場(S_6)、および送水管路(x_m)は全て新設するものとする。各送水管路の距離と地盤高低差を表1に示し、各配水池での計画給水量は図2に示してある。以上のデータを用いて、新設施設トータルコスト最小問題を解いた結果、表2に示す各管路の最適流量と最適規格管径を得た。また、各浄水場の最適規模を表3に示す。つぎに、エネルギー収支条件(10)式のもとでポンプ総費用最小問題を解いた結果、表4に示す最適ポンプ揚程を得た。このとき、各地点の有効水頭は表5に示す値となった。

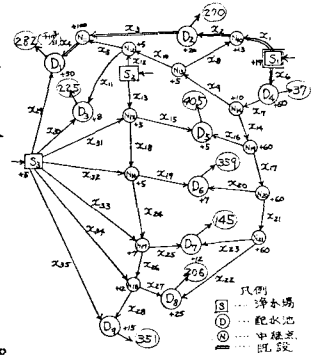


表1 各管路距離と地盤高低差

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
L_m (km)	13.0	9.8	8.8	9.4	6.1	7.1	10.9	6.7	10.8	6.7	10.1
H_m (m)	6.7	13.8	15.0	24.3	43.2	41.5	10.2	11.2	10.1	11.2	11.2

表2 各管路最適流量と規格管径

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
x_m (tph)	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210
R_m (mm)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200

表3 各浄水場最適規模

浄水場	1	2	3
最適規模	36 (4%)	589	86 / 830

表4 最適ポンプ揚程とポンプ設置有無

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
P_m (m)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
δ_m	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

表5 各地点の有効水頭

地点記号	S1	S2	S3	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11
有効水頭 E (m)	0.9	0.9	0.235	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
N_m	0.9	0.9	0.235	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

以上の結果、各送水管路の最適流量について表2をみると、 x_3 、 x_6 の小さい値を除き、33 t/hから550 t/hの間の流量が解として得られ、管路を敷設しない方がよいという解は出現しなかった。このことは、管路敷設費用が維持管理費も含めた全費用に対して小さいため、さらには、管路工事に伴う用地買収や道筋並びに河川管理者との交渉などの苦因を考慮していないために生じたものと考えられる。また、浄水場の規模を表3にみると、2つの浄水場がほぼ同じ規模となっている。これは、新設浄水場を2ヶ所と数少なくしたため、規模の経済性が結果に大きく反映しなかったと考えられる。さらに、ポンプ設置ヶ所も実際には集約する等の検討を要する。したがって、計画策定に際しては当然のことながら経験的評価も十分に考慮する必要がある。

4. おわりに

本稿では、広域水道施設基本計画において重要な計画課題となる基幹施設規模決定問題について、施設の予定位置が決まった後の施設規模の決定をコスト最小という評価のもとで行なった。この結果、経済的評価による基幹施設の計画案が抽出され、これを基礎情報として施設計画を行なうことが可能となった。本稿の今後の課題としては、提示したモデルを取来、導水施設等も含めたものに拡張することが考えられる。また、施設の位置をも1,0のスイッチ変数としてモデルに組み込むことも考えられ、この場合には浄水場や増圧ポンプの設置の有無および規格管の決定も含めた非線形整数混合計画(Non Linear Mixed Integer Programming)の適用が可能となろう。