

上水道総合運用システム

神 林 智 博

1. はじめに

横浜市の水道局は現在、全水道施設の水運用を総合的に調整管理するシステムを計画し施行中である。そのもととなるものは、第8回拡張事業と浄水施設整備事業で、両事業を合わせると工事費727億円、施行期間も昭和46年から昭和56年まで11カ年におよぶものである。もちろん水運用のシステムは両事業の一部であって、事業全体を代表するものではないが、その占める位置は大きい。

2. システムの目的

この総合的な水運用システムの目的は、つぎのとおりである。

2-1 効率的な水使用

前述の第8回拡張事業は年々急増する水需要のために横浜市が相模川で保有していた1,309,000m³/日の既得水源に加えて、新たに遠隔の酒匂川から神奈川県内広域水道企業団（以下「企業団」という）を通じて既水源保有量のほぼ50%にも相当する605,200m³/日の配分水量を受水し、市内に給水するためのものである。したがって、これら水源は巨額の費用をもって開発されたきわめて貴重なもので、かぎられた取水量で最大限の末端給水量を確保するため途中で消費される汙過池の洗浄用水や漏水量を最小限におさえることは重要である。

2-2 施設の適切な運営

横浜市の水道施設は明治20年に、本邦最初の近代的上水道として建設されて以来80余年にわたり種々の水道施設が建設され、第7回の拡張事業が終了した時には新旧施設が混在し、日常の水運用はきわめて複雑で面倒なものとなっていた。

そのうえ、企業団受水のため50%の増量に見合う種々の施設を増設するのであるから、配水池の水位制御やポンプの稼動など、施設の管理運営を、水道施設全体との有機的なつながりのなかで適切に行なうことはきわめてむずかしく、たとえば、配水池を溢れさせたり、空にするような事態も予測されるにいたった。そこで多様化した流水の体系と複雑な諸施設を誤りなく安全・円滑に管理運営するための措置が必要となった。（表1）

2-3 水圧の均等化

横浜市地形は埋立地の0m地帯から、近年急速に開発された標高50～100mにおよぶ丘陵地帯まできわめて起伏にとみ、かつこの丘陵地帯の間

表 1 施設概要

名 称	7 拡 終 了 時 (S46年)	8 拡 終 了 時 (S55年)
取 水 系 統	3 系 統	3 系 統
企業団受水地点	0	4 カ所
浄 水 場	4	4
配 水 池	15カ所	21カ所
配水ポンプ場	92カ所	34カ所
埋 設 管 延 長	3,928km	5,604km(推定)

には鶴見川、惟子川、大岡川などが流れ、丘陵をいくつかの塊に分断している。

このような地形は水圧のいちじるしい高低差をもたらす。したがって水道工学が理想とする均一な水圧保持もこのシステムの目的である。

2-4 水質管理

河川の水質汚濁に備えることは、清浄な飲料水の供給を目的とする水道事業にとって重要な課題である。それには水質の状況を迅速確実に把握することが肝要で、その情報をもとに、薬品注入について適切な意思決定を行わなければならない。

2-5 経済的取水

横浜市の保有する3系統の水源は水質の相違による薬品費、ならびに取水地点の標高差による動力費など、それぞれ水の生産原価が異なり、また企業団受水には一定の基本料金と受水量に応じた従量料金を支払う必要がある。すなわち、日常取水の水系別選択がもたらす経済的影響は大なるものがあり、いわゆる最適取水の概念が要求されるようになった。

3. 総合管理システムの構成

全水道施設の水運用を総合的に調整管理するシステム、いわゆる総合管理システムは便宜上これを大別して

- 上水道施設システム
- 情報設備システム
- 水運用システム

の3つに分類し、説明してみたい(図1)。すなわち上水道施設システムとは取水場、浄水場、配水池、ポンプ場およびこれらを結ぶ導送配水管路で「水」そのものを浄化、輸送する施設のシステムである。

つぎに情報設備システムとは電算機を中心とする各種の計装ならびに自動化装置などの設備や機器によるハードのシステムである。

最後に水運用システムとは、各種の情報を収集解析し、意思決定を行なうソフトのシステムであ

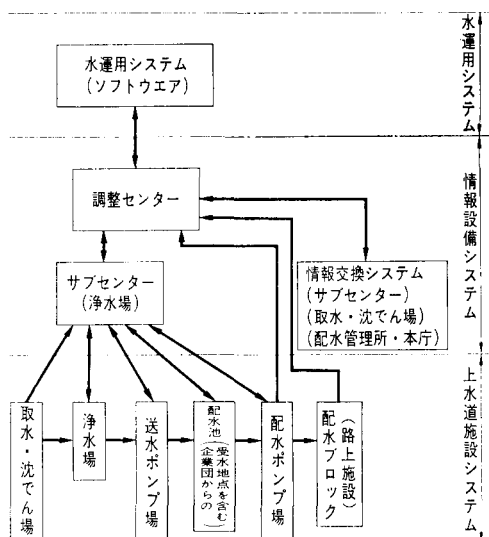


図1 総合管理システム構成図

る。

3-1 上水道施設システム

いうまでもなく水道事業は巨大な施設産業であって、これを簡単に取り替えるようなことはできない。そこでわれわれがもっとも苦心したのは前述のように、なんら規則性をもたない起伏にとんだ地形上に、80有余年の歴史的所産として建設されている複雑膨大な水道施設をいかにして論理的な、モデル化しやすい巨大システムとして体系的によみがえらせるかという点であった。そこで種々検討の結果、全市を21のブロックに区分し

- 1ブロックにかならず1配水池を設ける
- ポンプ場は1ブロック1カ所に集約する
- ブロック内を自然流下と加圧圧送の2地域に区分し、配水管網を整備する
- 4浄水場と4企業団受水地点の受け持ちブロックを明確にする
- ブロック間の相互融通をはかるため幹線網を設ける

という原則を立てた。

現在このブロックシステムの完成にむかって着々と配水池、ポンプ場および送配水幹線の建設工事を施行している。ブロックが完成した時点では、取水場——浄水場——配水池——配水ブロッ

クという流れを基本としてネットワークシステムが形成されるが、それをモデル化された輸送系ネットワークは取水場、分水池、沈澱場、浄水場、配水池、配水ブロックをノード、導水、送水、配水の各管路をブランチとして構成される。また、ノードは機能的に

- (1) 水量を発生する取水ノード（各取水場と企業団受水地点）
- (2) 水量を消費する需要ノード（各配水ブロック）
- (3) 水を貯溜する貯溜ノード（各配水池）
- (4) 水を収集、配分する分岐ノード（各浄水場、分水池）

に区分される。こうして、全水道施設の運用をネットワーク上の輸送問題としてとらえる手がかりができることになる。

3-2 情報設備システム

水の輸送系としての水道施設そのもののシステムは前記のとおりであるが、これを操作運用する管理システムは、「総合調整センター」を最高レベルとするハイアラキシステムで図2のように構成することとした。

3-3 水運用システム

水運用システムはつぎの機能で構成される。

- (1) 各種需要予測計算および修正計算
- (2) 各種運用スケジュール計算および修正計算
- (3) 配水コントロール計算
- (4) 薬品注入率計算
- (5) DDC制御アルゴリズム計算
- (6) 薬品在庫計画
- (7) 保全計画
- (8) 設備計画

このうち(1)から(5)までを第1期、(6)～(8)は第2期の開発とし、第2期分については当分の間将来の開発にそなえてデータの収集にとどめる予定である。これらの機能は単独で働くのではなく、おた

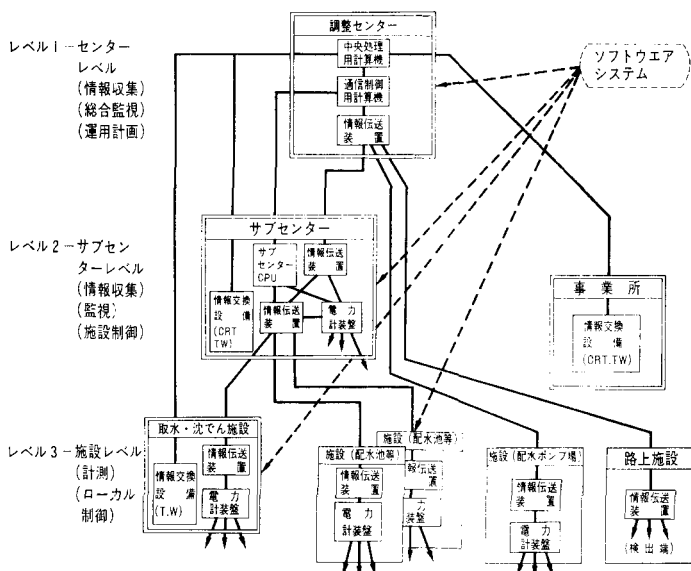


図2 システム構成図

がいに必要な情報をやりとりして有機的に働く。すなわち取水から配水ブロックまでを1つのシステムとしてとらえ、それぞれの目的関数をもとに各種の意思決定がされ、施設が運転される。以下これらのうちいくつかについて部分的にその考え方を簡単にふれてみたい。

3-3-1 各種需要予測計算

上水道システム運用の基本は、需要端で必要とする水量を過不足なく供給することである。このためには精度の高い需要予測の計算方法を開発し、同時に状況の変化に即応していつでも修正計算ができるように配慮することが必要である。需要予測計算はその使用目的によって時間幅のとり方や対象とする地域が異なるが、これを時間幅から分類すると表2のようになる。

この予測方法のうち、時間単位日間需要予測についてはつぎの方式で検討しており、実データによる解析を通じて予測式の改善をし、採用方式をきめていきたい。

1) 時系列予測法

予測対象（全市または配水ブロック）ごとにある時間帯の、過去数日および過去数十日の給水量実績値から指数平滑法により予測するもので、給水

表 2 予測の時間幅による需要予測の分類

区 分	時間幅による区 分	使用目的	予測の方法	数 式 等	モデル形態
長期需要予測	年単位長期間予測	施設計画	時系列予測法	直線式、二次式、指数平滑法、ロジスティック曲線	オフラインモデル
			構 造 分 析 予 測 法	予測対象の需要構造を細分化し各々の要因変化を考慮して予測する	"
	月単位年間予測	保全計画 受水計画	時系列予測法	変動要因を考慮に入れた時系列予測式	"
	週単位半年間予測	長期の運用 スケジュール	時系列予測法	社会的要因、気象的要因を考慮に入れた時系列予測式	"
短期需要予測	日単位週間予測	短期の運用 スケジュール	時系列予測法	過去の対応する曜日の需要近似値の指数平滑	オンラインモデル
翌日需要予測	時間単位日間予測	翌日の運用 スケジュール	時系列予測法	過去のある時間帯の需要近似値の指数平滑	"
			カ テ ゴ リ ー 予 測 法	需要変動に与える影響の大きい要因をみつけ、その要因を用いて統計的に予測	"

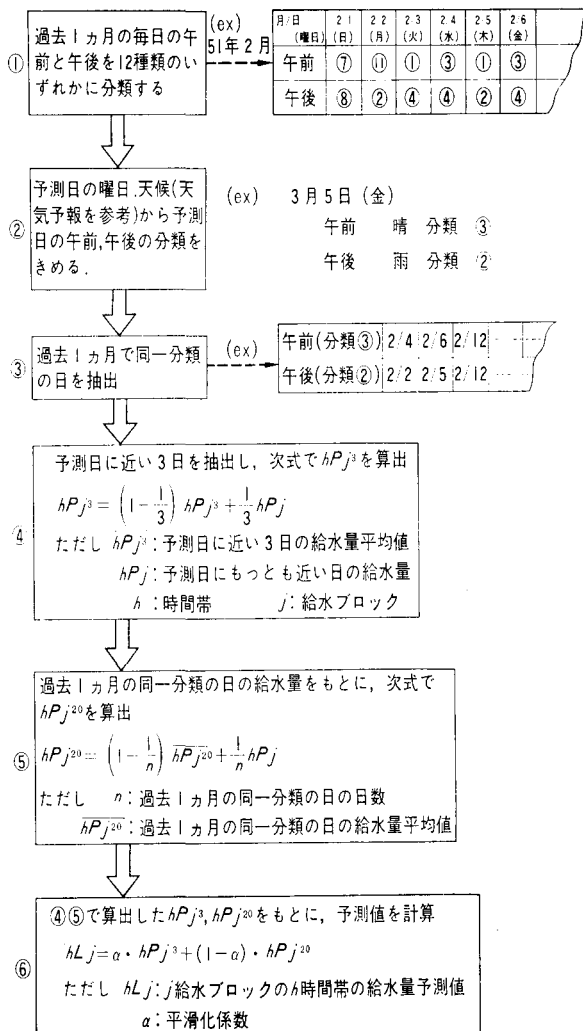


図 3 計算方法フロー

表 3 分類表

曜日		月	火	水	木	金	土	日・祭
天候	午前・午後							
	午前	⑪			①			⑤
雨	午後			②			⑨	⑥
	午前	⑫			③			⑦
晴	午後			④			⑩	⑧

量は平日、土曜日、日曜祭日、さらには天候によって影響を受ける。このためこれら異なるデータをいっしょにして予測することは、予測精度を低下させるから表3に示すように、曜日、天候について12種類に分類し、おのおの分類ごとに指数平滑を行なうもので、計算方法のフローを図3に示す。

この図のなかでは過去3日間か1カ月間のデータを利用しているが、この日数は実データによる解析で精度のもっとも高い日数に決定していきたいと考えている。また平滑化係数も一般的には $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}$ の間とされているが、実データの解析によっては修正されるであろう。

2) カテゴリー予測法

この予測法は、需要の変動に関係ある要因を用いて需要の予測を行なうもので、需要のポテンシャルを統計的に予測する方法である。

需要の変動に影響を与える諸要因としては

- 配水ブロックの性格
- 配水ブロックの下水普及率
- 月
- 曜日
- 休日および特殊日
- 前日の天候(定刻観測)
- 当日の天候(定刻観測)
- 当日の気温(定刻観測)

などが考えられる。

この予測法は要因のパターンがどのようなカテゴリーをとったとき、需要のパターンがどのカテゴリーになるかを調べるのが中心となる。この予測方法の流れ図は、図4に示すとおりである。

各時間単位の予測は、選択された需要パターンと当日の朝の立上り状況を組み合わせて行なう。需要予測の手順は、まず任意の時間までの需要積算値と1日の総需要との相関が強いことを用いて回帰式を作成し、1日の総需要を決定し、当該需要パターンにおける各時刻のウェイトから各時間単位の予測を行なうものである。

3-3-2 各種運用スケジュール計算

前述のような需要予測方法などで、全市の必要水量が算出されるが、つぎにこの総括的な水量を市内に有効適切に配分しなければならない。そのためには水質、水位、さらにはコストなど性格の異なる複数の水源と企業団受水地点からの各取水量、受水量を決定し、さらにこれらを複数の浄水場や配水池に配分し各施設を運転操作することになる。

この運用を最適化ならしめるための各種運用スケジュール計算がこのシステムである。またこの計算は平常時のほかに急激な需要変動や、水質異常、機器故障など種々の異常状況に対し残された条件のなかで、運用スケジュールの修正が可能ないように計画を考えている。運用スケジュールの構成は以下にのべるように、運転を円滑に行なうためにハイアラキー構成で考えている。

1) 長期スケジュール計算(週または旬単位半

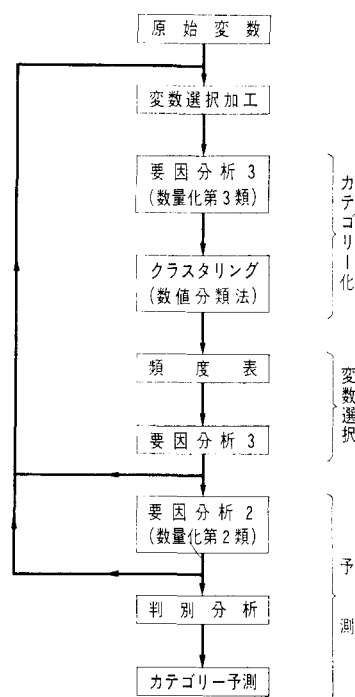


図4 カテゴリー化と予測の手法の流れ図

年の運用計画)

これは週または旬単位で半年間の各取水場から各配水池までの取水計画、企業団からの受水計画、送配水計画などをたてるものである。この運用スケジュールでは週または旬単位で運用する貯水池などがないので、時間要素を考慮しないステティック・モデルとするもので、この結果は短期の運用スケジュール(日単位週間)には反映されない。

2) 短期運用スケジュール計算(日単位週間の運用計画)

これは日単位で週間の各取水場から各配水池までの取水配分計画や送配水計画などを行なうものである。この運用スケジュールは、ずい道や浄水場内の時間的な流下遅れとか、相模原沈澱池や各配水池の貯水量の変化を考慮した時系列モデル(ダイナミックモデル)で、この結果は翌日運用スケジュール計算の浄水場における1日あたり処理水量や相模原沈澱池、および各配水池の初期水位を与える。

3) 翌日運用スケジュール計算 (時間単位日間の運用計画)

時間単位日間の各取水場から各配水池にいたるまでの取水配分計画や送配水計画などを行なう。この運用スケジュールは取水場から配水池までを一括して取り扱い、沈澱池、配水池などの水位上下限值を守りながら、経済性を指標として最適運用をはかることを目的に計画する。

このなかで1日トータル水量の配分計画は、LPなども考えられるが、傾斜法の一つである FPFM 法で解くことを予定している。

4) 当日オンライン修正

これは需要予測誤差による運転精度の低下や、当日の事故などによる施設能力の変化にともない、あらかじめ決定された翌日スケジュール計画では運転ができなくなったとき、それぞれの条件にあった運転を行なうための修正計算のことで、予防制御と緊急制御とから構成することを考えている。

以上需要予測計算、運用スケジュール計算の関係をまとめると図5に示すようになる。

3-3-3 配水コントロール

配水コントロールは管路網の水需要負荷に応じて、管網内のポンプ圧と弁開度を制御し、管路網

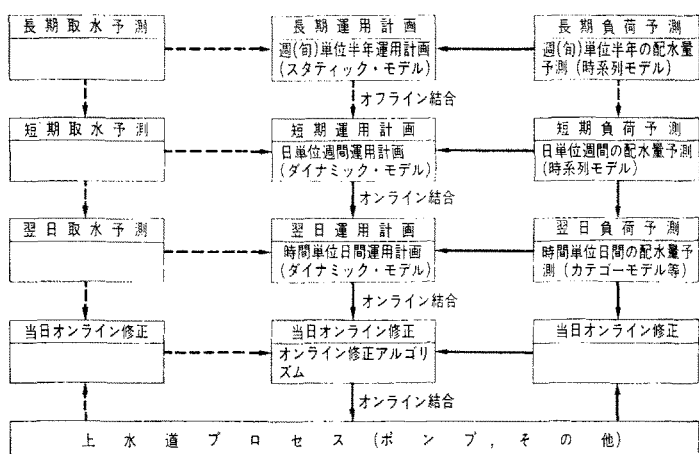


図5 運用システム機能ブロック図

の圧力分布を適切に保持するための制御である。これはネットワークシステムにおいて、各ノードに関する横断変数と各ブランチ間を流れる通過変数、さらにこれら変数を制御する制御変数を取りあつかうことになる。

これにはオフライン計算として

- ①ネットワーク圧力流量分布計算
- ②ネットワーク感度解析計算
- ③最適ポンプ圧、弁開度決定計算

また実施後のオンライン計算として

- ①ポンプ圧、弁開度修正計算

がある。

ここでネットワーク感度とは各圧力制御機器を単位量増加した場合の各ノードでの圧力変化量である。一例として図6にネットワーク圧力流量分

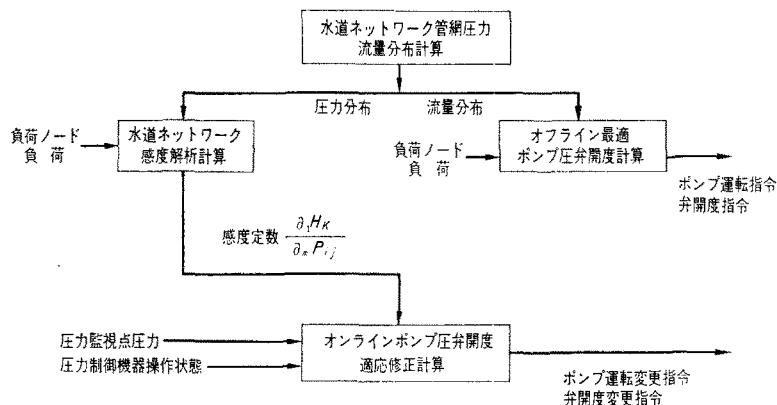


図6 配水コントロール機能ブロック図

布計算の考え方を機能ブロック図で示す。

まず最初に管網負荷を予測しなければならないが、それはつぎのように行なう。

- (1) 各配水ブロック内にかかる全負荷戸数（家の数）を把握する
- (2) 各配水ブロック内の管網モデルの各負荷ノードにかかる負荷戸数をおおまかに分割する
- (3) 各配水ブロックの当日配水量予測計算をもとに、各配水ブロックにかかる負荷を1日4パターン（夜間、午前、午後、ピーク時）程度にわけ、それぞれのパターンについて単位時間（1秒）あたりの平均負荷を計算する
- (4) (3)で計算した単位時間あたりの平均負荷を(1)で求めた全戸数で割り、各パターンごとに対象配水ブロックの1戸あたりの負荷流量を計算する
- (4) (5)で計算された各パターンにおける1戸あたりの負荷流量に各負荷ノードにかかるパターン内単位時間あたりの負荷流量を計算するすなわち

- (1) j 配水ブロックの全負荷戸数 N_j の推定
- (2) j 配水ブロック内の各負荷ノードにかかる戸数 iN_j の推定 ($N_j = \sum_{i=1}^m iN_j$)

- (3) j 配水ブロックの当日配水量 hL_j 予測計算 (h は時間を示す)

- (4) 各パターン（夜間、午前、午後、ピーク時… p であらわす）の単位時間（1秒）あたりの j 配水ブロックにかかる平均負荷 sL_j^p の計算
- (5) j 配水ブロック内の1戸数あたりにかかる平均負荷計算

$$sL_j^p = \frac{sL_j^p}{N_j}$$

- (6) j 配水ブロック内の i 負荷ノードにかかる P パターン時間帯の負荷計算

$$iQ_j^P = sL_j^P \cdot iN_j$$

つぎに前述の負荷に圧力制御機器の操作状態を与えて計算を行なう。

Q_j : j ノードの流入量, 流出量（流出量の時は正

流入量の時は負）

$P_{ij} = -P_{ji}$: $i \rightarrow j$ ノード間のポンプ圧, 弁ロス
（ポンプ加圧は正, 弁ロスは負）

H_i : i ノードの動水位

とすると, 管網方程式は

$$\sum_{i=2}^n Y_{ji} H_i = Q_j + \sum_{i=1}^n Y_{ji} P_{ji} - Y_{j1} H_1 \quad (1)$$

$$j=2, 3, \dots, n$$

となる。ここで

$$Y_{ij} = Y_{ji} = \frac{0.27853 \cdot C_{ij} \cdot D_{ij}^{2.63}}{L_{ij}^{0.54} |H_i - H_j + P_{ij}|^{0.46}}$$

L_{ij} : $i \rightarrow j$ ノード間の管路長 (m)

C_{ij} : " 流速係数

D_{ij} : " 管径 (m)

n : ネットワークの数

H_1 : 基準流入ノードの動水位

である。

(1)式において, Q_j ($j=2, 3, \dots, n$), P_{ji} ($i, j=1, 2, \dots, n$), H_1 は与えられた値であり, H_i ($i=2, 3, \dots, n$) が未知数である。

したがって $n-1$ 個の未知数に対して, $n-1$ 個の方程式が存在し解は一意的に定まる。しかし, アドミッタンス行列 Y_{ij} が H_i の非線形関数であるため, 簡単に連立方程式を解くことはできない。このため逐次繰返し計算法によって(1)式を解く。

(1)式において

$$\underline{Y} = \begin{pmatrix} Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2n} \\ Y_{32} & Y_{33} & \dots & Y_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n2} & Y_{n3} & \dots & Y_{nn} \end{pmatrix} \quad \underline{H} = \begin{pmatrix} H_2 \\ H_3 \\ \vdots \\ H_n \end{pmatrix}$$

$$\underline{Q} = \begin{pmatrix} Q_2 & - & Y_{21} H_1 \\ Q_3 & - & Y_{31} H_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ Q_n & - & Y_{n1} H_1 \end{pmatrix} \quad \underline{P_j} = \begin{pmatrix} P_{j1} \\ P_{j2} \\ \vdots \\ P_{jn} \end{pmatrix}$$

$$\underline{Y_j} = \begin{pmatrix} Y_{j1} \\ Y_{j2} \\ \vdots \\ Y_{jn} \end{pmatrix} \quad \underline{Y_j P} = \begin{pmatrix} Y_2^T P_2 \\ Y_3^T P_3 \\ \vdots \\ Y_n^T P_n \end{pmatrix} \quad \underline{Y_j^T} : \underline{Y_j} \text{ の転置}$$

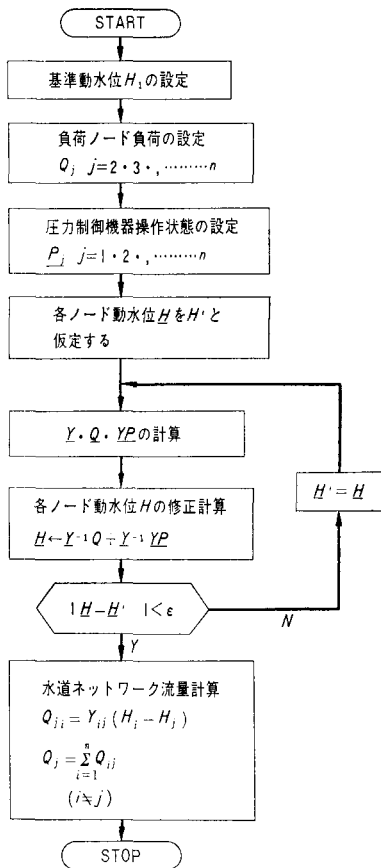


図 7 管網計算フロー

とすると(1)式は

$$\underline{Y} \underline{H} = \underline{Q} + \underline{Y} \underline{P} \quad (2)$$

したがって

$$\underline{H} = \underline{Y}^{-1} \cdot \underline{Q} + \underline{Y}^{-1} \cdot \underline{Y} \underline{P} \quad (3)$$

となる。

(3)式を満足する解 $\underline{H}$ を求めるために

- (1) $\underline{H}$ を適当に $\underline{H}'$ と仮定する
- (2) $\underline{Y} \cdot \underline{Q} \cdot \underline{Y} \underline{P}$ の計算をする
- (3) $\underline{H} \leftarrow \underline{Y}^{-1} \underline{Q} + \underline{Y}^{-1} \underline{Y} \underline{P}$ により $\underline{H}$ の修正計算をする
- (4) $|\underline{H} - \underline{H}'| < \epsilon$ であれば計算終了
 $|\underline{H} - \underline{H}'| \geq \epsilon$ であれば(2)へといった逐次繰返し計算を行なう。

さらにこのようにして求めた $\underline{H}$ を使用し

$$Q_{ij} = Y_{ij} (H_i - H_j)$$

$$Q_j = \sum_{i=1}^n Q_{ij} \quad (i \neq j)$$

のように流量分布を計算する。

以上のような管網計算フローを図7に示す。

3-3-4 薬品注入率計算

水質管理の万全を期するためには、的確な情報のもとに迅速に適切な薬品注入を行なう必要がある。このためには、あらゆる水質状況に対応した薬品注入率計算方式を確立することが必要である。これには精度の高い水質情報を、少なくとも3年間分以上用いて解析することが必要で、とりあえず情報を収集することを計画しており、順次解析しモデル式を作成していきたいと考えている。

む す び

以上、横浜市において施行中の上水道総合運用システムの概略を、きわめて部分的にのべた。

現在までに配水池、ポンプ場、配水管などの施設は、各所で着々と工事がすすめられ、いくつかの完工をみており、また電算機を中心とし、データ・伝送をベースとする情報設備システムもほぼ設計を完了し、一部の機場では工事ははじまっている。

しかし、ソフトの水運用システムについてはシミュレーションなど、試験的ないくつかの計算結果はあるものの、前述のとおりまだきわめて概念的な思考の域を脱していない。まがりなりにもこれを完成するには今後相当の時間と労力を傾注しなければならぬものと思う。

かんばやし・ともひろ 1931年生
 1952年12月 横浜市水道局入局
 1966年2月 第2配水課長
 1968年10月 計画課長
 1975年6月 工事部長