

## 大規模水道システムの地震時信頼度評価法

### RELIABILITY EVALUATION METHODS OF LARGE-SCALE WATER SUPPLY NETWORKS DURING SEISMIC DISASTER

磯山 龍二\*・片山 恒雄\*\*

By Ryoji ISOYAMA and Tsuneo KATAYAMA

#### 1. ま え が き

ここ数年、水道システムを始めとする、いわゆるライフラインの地震時におけるシステムの機能評価に関する研究が盛んになりつつある。ライフラインシステムでは被害ばかりでなく、地震後のシステム機能が重要であることを著者らは繰り返し指摘してきた。しかしながら、いまだに実際の防災対策に資料を提供できるような現実的な機能評価法は開発されるに至っていない<sup>1),2)</sup>。この原因として、ネットワーク・システムとしての取扱いの複雑さ(多入力・多出力等)もさることながら、地震時はもとより平常時におけるシステムの特長・挙動さえも十分に認識せずに問題の解決にあたらうとした研究者の姿勢も指摘されねばならない。

本論文では大規模水道システムの送配水幹線網を対象として、より現実的な地震時機能の評価法を提案する。まず、地震発生から数時間、あるいは1日程度の間到大規模送配水幹線網において行われるであろう人為的な配水調整がシステム機能に大きな影響を及ぼすことを指摘する。この事実を踏まえて、供給点と需要点の連結性、管路性能、節点エネルギー位(配水池水位等)、供給量と需要量のバランス等の物理的な特長ばかりでなく、配水調整を行う際の基本的な考え方の相違(地震時の水供給戦略とよぶ)をも考慮できる機能評価法を提案する。

地震時の埋設管の被害など不確定性の高い要素が重要な影響を及ぼす水道システムの機能評価は確率的に行わざるを得ない。ここでは、ある想定地震が与えられたときの平均的な信頼度をモンテカルロ・シミュレーション法によって評価する。図-1にこの概略の流れを示す。要素の被害として、本論文の試算例では管路の被害のみ

を考える。

本論文で提案する機能評価法は、図-1の5の部分にあたる。著者らは、可能流量法-I (Possible Flow Method-I, PFM-I), 可能流量法-II (Possible Flow Method-II, PFM-II), 最小抵抗法 (Shortest Route Method, SRM) の3種類の方法を提案しているが<sup>3)</sup>、本論文では PFM-I と SRM について説明する。これらの方法は、対象としているシステムの特長によって使い分けられ、それぞれ、評価基準の粗さ(精度)や必要な計算時間の長短に違いがある。大規模送配水幹線網で

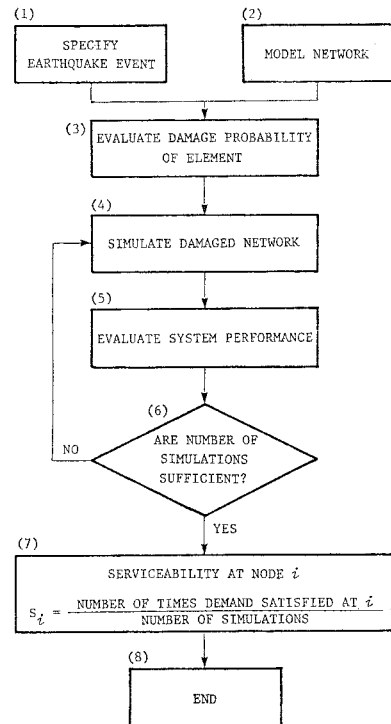


Fig. 1 General Flow Chart of System Performance Evaluation by Monte Carlo Simulation.

\* 学生会員 工博 日本技術開発(株)(研究当時 東京大学生産技術研究所研究生)

\*\* 正会員 Ph. D. 東京大学助教授 生産技術研究所

は、物理的に厳密な機能評価を行うことはほとんど不可能といってよく(2. 参照)、いずれの方法もある仮定に基づく近似的な機能評価法である。まず、2つの方法を簡単な例題管網に適用し、それらの基本的妥当性等の検討を行う。最後に、大規模システムの例として東京都水道システムを取り上げ、ケース・スタディーにより想定地震のもとでの信頼度を試算する。

## 2. 大規模水道システムの特性と地震時の対応

地震時機能評価法を構成するにあたって、まず、評価の対象となるシステムを十分知っておかねばならない。図-2は大規模水道システムを模式的に示している。このようなシステムでは、一般に、水は浄水場から送配水幹線網により各配水区域を担当する配水基池(給水所)に送られ、ここから配水管網・給水装置を経て需要家に供給される。このほかに、幹線から直接、配水管網に供給されることもある。また、配水区域間には事故時に備えて連絡管が設けられるのが普通であるが、連絡管を通して送水可能な量は一般に限られており、まず、送配水幹線網を対象とした機能評価が必要となる。

大規模送配水幹線網の大きな特徴の1つは、システムの人為的なコントロールが可能な点である。特に近代的なシステムでは、ポンプ加圧による送水が主流になりつつあり、ますますこの傾向が強まっている。図-2に示す給水所は通常、配水池としてばかりでなく幹線に対するポンプ所としても機能しており、浄水場も含めて平常時においても需要の変動に応じてさまざまな配水調整が

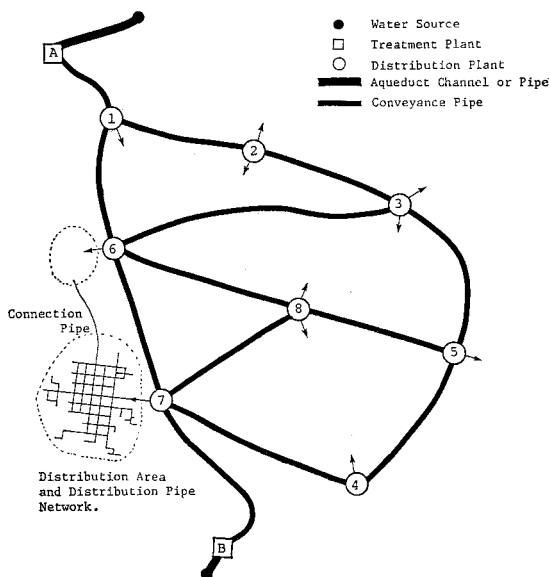


Fig. 2 Schematic Explanation of a Large-Scale Water Supply System.

行われている。また、管路の随所に設けられたバルブの操作による配水調整も行われる。

地震により幹線に被害が発生すると、まず、被害箇所 の両側でバルブが閉じられる。この作業には地震発生後 数時間から1日を要すると考えられる<sup>4)</sup>。次に浄水場、 給水所、バルブ等の操作による配水調整が行われる(通 常の事故の際には、できるだけ影響範囲が小さくなるよ うな配水調整がなされる)。この後復旧が開始され、復 旧の進展に伴ってさらに適切な配水調整が行われ、断水 区域を減らしていくことになる。

地震時の配水調整の方法は、被害、需給の状況、システ ムの特性等を十分に把握している責任技術者が決定する ことになろうが、この配水調整の背景となる基本的な考 え方を地震時の水供給戦略とよぶことにする。地震時水 供給戦略とは、優先して供給する需要点(地域)を選ぶ基 準と考えることができる。浄水場の被災等によって水の 絶対量が不足した場合には、特に供給戦略が重要となる。

地震時供給戦略を支配する要素としては以下のような ものが考えられよう。

- (a) 水理的に有利な管路(より重要な幹線と考えて よい)の優先。
- (b) 需要量の大きい(あるいは小さい)需要点の優 先。
- (c) 地震時に重要と思われる地域(需要点)の優先。
- (d) 地域の利用形態の考慮。
- (e) 局所管網(配水管網)の被害程度の考慮。
- (f) 上記のいくつかの混合戦略。

(a)は最も基本的でかつ最も自然な戦略である。幹線の 水圧低下は地下水の浸入の原因となり、復旧が困難とな る。したがって、より重要な幹線ほど水圧を保つ努力が 払われるであろう。(b)は需要量の大きい(広い)地域 を集中的に供給するか、需要量の小さい地域に分散して 供給するかの問題である。(a)が物理的な戦略と考えら れるのに対して、(b)以下はより人為的である。地震時 には物理的な条件を多少おろそかにしても(たとえば水 頭損失の大きい管路を通して)防災拠点等へ優先的に 水を送らねばならないかもしれない[(c)]。また、工業 地域、商業地域への供給を制限して住宅地へ優先的に送 水することも考えられる[(d)]。大地震時には局所的な 配水管網・給水装置に多大な被害が見込まれるが、当初 は漏水の影響をある程度無視せざるを得ない<sup>4)</sup>。したが って、局所管網の被害の大きい地域では漏水量ははなは だしく大きくなり、この地域全体の供給を停止すること もあろう[(e)]。実際には上記の戦略が単独でとられる ことは考えられず、(f)のように、いくつかの戦略を混 合した戦略がとられると思われる。システム機能は採用 した戦略により大きく異なる。

### 3. 機能評価の前提

もし地震直後の火災への対応を考えるならば、被害箇所から漏水している時点、あるいは、被害箇所がバルブ操作により分離された時点の機能評価が必要となる。これに対し応急給水計画等の事前の防災対策を立てる際には、配水調整後の機能評価が必要となる。

地震直後の機能は通常の管網解析法により評価可能である<sup>5),6)</sup>。管網解析を行うためには、配水池水位、ポンプ揚程、バルブの状態等すべての条件が設定されねばならないが、この場合には地震直前(平常時)の設定条件をそのまま用いることができる。ところが、配水調整を行えば当然ながら設定条件が変わってくる。たとえば、システム内の 10 の施設(給水所等)で 2 つの状態(ON, OFF 等)のみが設定可能としても、2<sup>10</sup>通りのコントロールの可能性があることになる。実際のシステムではコントロール可能な施設も、コントロールの方法もはるかに多い。これらすべての組合せに対して管網解析を行い、最良の機能を選ぶことも考えられようが、計算時間を考えても非現実的である。したがって、特に事前防災対策の指針を得るためのシミュレーション手法を考える場合、大規模幹線網の地震時機能を管網解析で厳密に評価することは事実上不可能と考えられる。

本論文で提案する機能評価法は、物理的な制約条件の範囲内で、ある供給戦略に従った配水調整が地震時には行われることを大前提とし、その結果の機能を評価する。機能評価の過程においては、ポンプ揚程、バルブの開閉など配水調整の仕方は具体的に指定されない。ある与えられた供給戦略による結果的な各需要点の供給可能性が判定される。この考え方の裏には、適当な配水調整により、その機能が達成可能であるという仮定がある。ただし、評価モデル(ネットワーク)には、それぞれの枝(管路)の両側節点の機能を考慮して、流向・流量を与えるなど、コントロール可能な部分とそうでない部分を明確にしておく必要がある。実際のシミュレーションで必要となる管路の被害率や枝の被害確率の求め方は 6. で詳しく述べる。

### 4. 可能流量法-I

可能流量法-I (PFM-I) は、図-2 に示すような、各節点でエネルギー位(配水池水位、ポンプ揚程)が与えられる管網に適用される。各管路(枝あるいは Branch とよぶ)には両側節点のエネルギー位および管路特性により、送水可能な流量(枝流量, Branch Flow)が与えられる<sup>注1)</sup>。このとき、上流側においても下流側におい

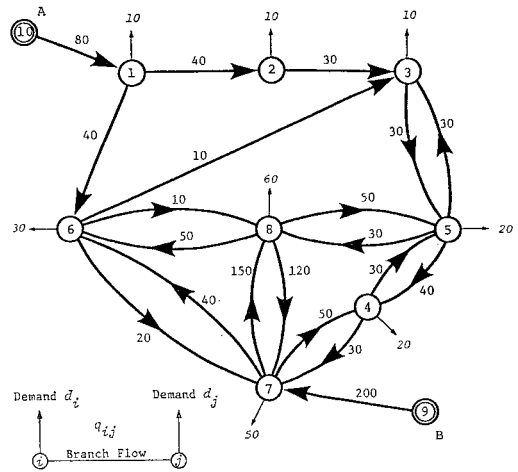


Fig. 3 A Model Network for PFM-I.

ても配水池水位は、ある一定の値を仮定する。枝流量は、両節点間でコントロール可能な送水量の上限を与える。

図-3 に、PFM-I による評価のためのモデル・ネットワークの例を示す。これは、図-2 の管網を PFM-I の評価のためにモデル化したものである。PFM-I では、上記の枝流量のほかに、各枝の流向および各需要点の需要量を与える。モデルネットワークには流向が逆な一対の枝がいくつかの節点間に存在する。実際には 1 本の管路であるが、節点(給水所等)の機能により両方向に送水が可能のため、配水調整の可能性を与えている。この場合、ポンプ能力等により両方向で枝流量は一般に異なる。上述の仮定と与えられた供給戦略のもとで、PFM-I は、供給可能性の厳密な解を与える<sup>注2)</sup>。

#### (1) 基本的な考え方

PFM-I をはじめ、本論文で提案する機能評価法は任意の地震時供給戦略の設定が可能であるが、最も自然と思われる前述(a)の供給戦略を基本的に採用する。すなわち、供給点(浄水場とする)からみてより水理的に有利な需要点を基本的に優先することにし、他の戦略はこれに付加されるものとする(これらを 2 次的戦略とよぶ)。

ある被害パターンが与えられたときの評価の流れの概略は以下のとおりである。

まず、1 つの供給点を任意に選び、ここからの供給を考える。この供給点に連結したすべての需要点について 1 本の径路を通して送水可能な最大の流量(最大可能流量, Maximum Possible Flow)とその径路を求める。

注 1) ネットワーク理論における枝容量に相当する。

注 2) 配水池水位一定を仮定しているため、PFM-I による解はキルヒホッフの法則を満足する 1 つの解である。

最大可能流量は水理的な有利さの指標と考えられ、この量を基準にして他の2次的戦略も考慮しながら供給する需要点を1つ選び、その節点の需要量を最大可能流量の径路を通して送る。最大可能流量径路上の枝流量は、すでに流した分だけ減ぜられる。この状態で再び最大可能流量を求め、次の需要点を選び供給する。途中で供給点の能力が尽きれば次の供給点に移る。上記操作をすべての供給点に対して繰り返すことにより、各需要点の供給可能性を検討する。需要点を選び供給していく過程は、一種の配水調整と考えられる。

最大可能流量は本質的には需要点の供給可能性を判定するために用いられる。1本の径路を通して需要量を満たすことができなければ、後の供給の段階で別の径路を通して不足分が供給される。途中でこの需要点の最大可能流量が零になれば、この需要点は、その段階で供給された分の需要量のみが満たされたとして記憶される。

(2) 枝流量  $q_{ij}$

隣接節点  $i$  と  $j$  の間の送水可能流量、すなわち枝流量  $q_{ij}$  は、Hazen・Williams の式を用いると次式で計算できる。

$$q_{ij} = \left( \frac{E_i - E_j}{\sum_e R_e} \right)^{0.45} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

- $E_i$ : 上流側節点  $i$  のエネルギー位 (m)
- $E_j$ : 下流側節点  $j$  のエネルギー位 (m)
- $e$ : 節点  $ij$  間の管路要素
- $R_e = 10.666 \cdot C_e^{-1.85} \cdot D_e^{-4.87} \cdot L_e$
- $C_e$ : 管路要素  $e$  の流速係数
- $D_e$ : 管路要素  $e$  の管径 (m)
- $L_e$ : 管路要素  $e$  の延長 (m)

$E_i$  は配水池水位あるいはポンプ揚程であり、 $E_j$  は配水池水位である。配水池水位は節点に固有のある一定値を仮定する。

(3) 最大可能流量  $f_{ki}$

供給点  $k$  から需要点  $i$  へ1本の径路を通して送水可能な最大の流量を最大可能流量  $f_{ki}$  と定義する。 $f_{ki}$  は次式で表わされる。

$$f_{ki} = \max_{\substack{\text{all routes} \\ \text{from } k \text{ to } i}} \left\{ \min_{\substack{\text{all branches} \\ \text{on a route} \\ \text{from } k \text{ to } i}} q_{mn} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

式 (2) はネットワーク理論における最短径路アルゴリズムを応用して簡単に計算できる。付録に Warshall-Floyd 法<sup>7)</sup>に基づく全節点間の最大可能流量とその径路を求めるサブルーチンを示す。

(4) 地震時の水供給戦略

本論文におけるシミュレーションでは、2. で述べた

(a) の戦略を基本的に採用し、2 次的な戦略として (b) を用いることにする。水理的な有利さの指標としては、最大可能流量  $f_{ki}$  を採用し、以下の2種類の戦略を考えた。

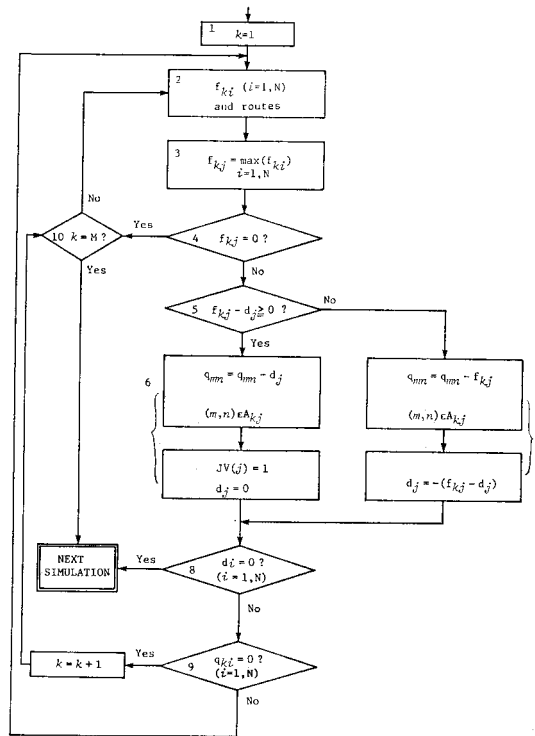
Case 1:  $f_{ki}$  の大きい需要点を優先し、もし  $f_{ki}$  が同じならば、需要量の大きい点から供給する。

Case 2:  $f_{ki}$  が同じならば Case 1 とは逆に、需要量の小さい点から供給する。

次節の図-4 に示す機能評価の流れは、この戦略によって書かれているが、需要点の供給優先度を順位づける他の基準を導入することにより、他の2次的な戦略を組み込んだ混合戦略で機能評価が可能である。

(5) 機能評価の流れ

図-4 に被災ネットワークに対する PFM-I の評価の



- $f_{ki}$ : Maximum Possible Flow from Supply Node  $k$  to Demand Node  $i$ . ( $i=1, \dots, N, k=1, \dots, M$ )
- $N$ : Number of Demand Nodes.
- $M$ : Number of Supply Nodes.
- $q_{ij}$ : Branch Flow from Node  $i$  to Node  $j$ .
- $d_i$ : Demand at Node  $i$ .
- $A_{kj}$ : Set of Branches along the Maximum Possible Flow Route from  $k$  to  $i$ .
- $JV(j)$ :  $JV(j)=1$  Indicates that the Service at Node  $j$  has been Fulfilled.

Fig. 4 Flow Chart of Possible Flow Method-I.

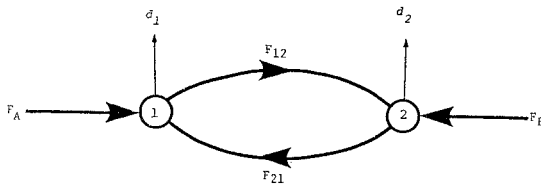


Fig. 5 Flow between Nodes 1 and 2.

流れを示す。戦略 (a) で需要点を選ぶ部分は 図-4 の 3 にあたり、 $f_{ki}$  の大きい需要点から選んでいく。他の戦略を用いるときには、この部分を変更すればよい。2 次的な戦略 (b) は、Case 1 のときには需要量の大きい順に節点番号をふるることにより自動的に満足させることができる (Case 2 のときにはこの逆)。

図-3 のモデルネットワークにおいて、節点間に流向が逆な一対の枝が存在する。実際には 1 本の管路であり、同時に両方向に流すことは不可能であるが、機能評価の過程では独立に扱ってよい。図-5 に示す簡単な例でこのことを示す。節点 1, 2 におおの流量  $F_A, F_B$  が流入し、両節点の流出量(需要量)が  $d_1, d_2$  であるとする。機能評価の結果両方向におおの  $F_{12}, F_{21}$  が流れ、いま、 $F_{12} > F_{21}$  であったとすると、両節点における流入出のつり合い条件は、

$$\begin{cases} F_A = d_1 + (F_{12} - F_{21}) \\ (F_{12} - F_{21}) + F_B = d_2 \end{cases} \quad (3)$$

となる。したがって、

$$F_A + F_B = d_1 + d_2 \quad (4)$$

となり、入出力のバランスは保たれており、1 から 2 へ ( $F_{12} - F_{21}$ ) の流量が流れたと理解される。

(6) 信頼度の評価

モンテカルロ・シミュレーションを必要な精度が得られるまで繰り返すことにより、以下のような諸量が求まる。シミュレーションの全回数を  $M_s$ 、節点  $i$  で  $r$  番目のシミュレーションにより得られた水量を  $v_i^r$  とする。 $d_i$  を節点  $i$  の需要量とすると、 $v_i^r = d_i$  のとき、この節点は必要量が完全に満たされたことになり、この回数を  $N_i$  とする。需要点  $i$  の供給信頼度 (Serviceability) を

$$S_i = N_i / M_s \quad (5)$$

で定義する。節点  $i$  で供給される量の期待値は、

$$Q_i = \frac{1}{M_s} \sum_{r=1}^{M_s} v_i^r \quad (6)$$

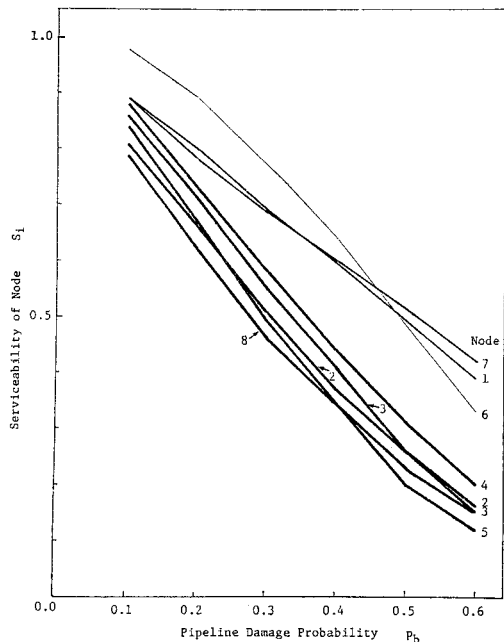
となり、システム全体の供給量の期待値は、

$$Q_T = \frac{1}{M_s} \sum_{r=1}^{M_s} \left( \sum_{i=1}^N v_i^r \right) \quad (7)$$

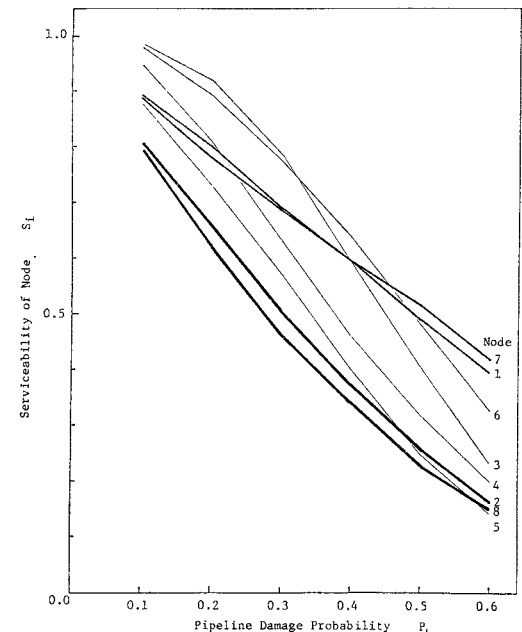
で求められる。ここで  $N$  は需要点数である。

(7) 例題シミュレーション

図-3 の評価モデルネットワークに対して信頼度評価を行い、(4) で述べた 2 つの戦略を比較した。すべての枝の被害確率を同じとし、それぞれの戦略について 1000 回のシミュレーションを行った。節点の被害は考えていない。



(a) Case 1 Priority is Given to Nodes with Greater Demand If Possible Flows are the Same.



(b) Case 2 Priority is Given to Nodes with Smaller Demand If Possible Flows are the Same.

Fig. 6 Serviceability by PFM-I.

Case 1 の結果を 図-6 (a) に示す。枝被害確率を変化させ（もちろん全部の枝で同一の値のまま）各需要点の供給信頼度の変化をみたものであるが、曲線の形から需要点が3つのグループに分けられることがわかる。これを、システムの信頼度曲線と比較して考えると、節点 1, 7 は 1 要素システム、2, 3, 4, 5, 8 は直列システム、6 は並列システム的におのおの挙動していると考えられる。これらは、各節点のシステム内の位置を考えてもおおよそ理解されるだろう。

Case 2 の戦略を採用したときの結果を 図-6 (b) に示す。この結果を Case 1 の場合と比較してみると、節点 1, 7, 2, 8 はほとんど変わらないものの、節点 3, 4, 5, 6 の信頼度は向上している。しかも、節点 6 に加えて 3, 4 の信頼度曲線も並列システムの特性を示す。

供給信頼度が Case 2 の方が全般的に高いのに対して、枝被害確率の 1 つの値に対するシステム全体の供給量の期待値  $Q_T$  は Case 1, Case 2 でほとんど変わらない。供給信頼度評価においては、需要が完全に満たされた場合のみがカウントされ、不完全な供給 ( $v_i' < d_i$ ) は評価されないためである（式 (5) 参照）。例題システムで最大の需要量をもつ節点 8 の供給量期待値  $Q_8$  は当然、Case 1 の場合の方が大きい。ところが、図-6 からわかるように供給信頼度は両戦略で変わらない。Case 1 では需要量に満たない供給が多く、これが  $Q_8$  を大きくし、また、 $Q_T$  にも貢献している。一方、Case 2 では、節点 8 に対する不完全な供給分が他のより需要量の小さい節点に回されるため、節点 8 の信頼度はそのまま、節点 3, 4, 5, 6 の信頼度が向上している。もし、ここで与えた需要量が、各点の最小限の必要量であるとすれば、システムの余裕度を有効に使えることもあり、この例では Case 2 の方がよいようである。

## 5. 最小抵抗法

最小抵抗法 (SRM) はエネルギー位が与えられない節点の存在する、すなわち単なる分岐節点が存在する管網に対して適用される。大規模送配水幹線網に 2 次的な管網を付加した場合や、中小規模の水道システムで地震時に水供給戦略がその機能に重大な影響を与える場合などへの適用を考えて開発された方法である。このような管網では枝流量が求められないため、各管路に水理的な抵抗を与え、供給点からの総抵抗が小さい需要点ほど基本的に優先して供給する。供給可能性の判定は連結性のほかには、

$$\text{総供給量} \geq \text{総需要量}$$

のみである。

被災ネットワークに対する機能評価の流れを以下に示

す。

1. すべての枝に対して次の抵抗値  $R_{ij}$  を計算する。 $e$  は枝  $ij$  内の管路要素であり、 $C_e$ ,  $D_e$ ,  $L_e$  はおのおの要素の流速係数、管径 (m)、延長 (m) を指す。

$$R_{ij} = 10.666 \cdot \sum_e C_e^{-1.85} \cdot D_e^{-4.87} \cdot L_e \dots\dots\dots (8)$$

2. 最短経路アルゴリズム<sup>7)</sup>を用い、供給点  $k$ 、需要点  $i$  の間の最小抵抗値  $\min R_{ki}$  を求める。 $\min R_{ki}$  は次のように定義される。

$$\min R_{ki} = \min_{\text{all } p} \left( \sum_{(m,n) \in B_{ki}^p} R_{mn} \right) \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $B_{ki}^p$  は  $k$  から  $i$  への  $p$  番目の径路に沿った枝の集合であり、 $m, n$  はその径路上の節点番号である。

3.  $\min R_{ki}$  に 2 次的な戦略を加え、需要点の供給優先順位を与える。優先順位  $S$  番目の需要点  $i$  の需要量を  $d_i^S$  とする。

4. 任意に決めた供給点から、3. の順位に従って供給する。この供給点の供給能力を  $Q_C$  とすれば、

$$Q_C \geq \sum_i d_i^S \dots\dots\dots (10)$$

の範囲内で優先順位に従って供給し、次の供給点に移る。

本方法は以下に示すような簡単な水理的背景によっている。供給点  $k$  からある需要点  $i$  までの 1 本の径路の流れを考える。この径路には途中、分岐も抜き出しもないものとする。すると、 $i$  でのエネルギー位  $E_i$  は、

$$E_i = E_k - \sum_{(m,n) \in B_{ki}} H_{mn} \dots\dots\dots (11)$$

となる。ここで、 $E_k$  は供給点のエネルギー位、 $H_{mn}$  は枝  $mn$  における損失水頭、 $B_{ki}$  はこの径路上の枝の集合である。管路流量  $Q$  は一定であるから、式 (11) に Hazen・Williams の式を代入することにより、

$$E_i = E_k - Q^{1.85} \sum_{(m,n) \in B_{ki}} R_{mn} \dots\dots\dots (12)$$

が得られる。上式の  $R_{mn}$  は式 (8) の  $R_{ij}$  にほかならない。いま、エネルギー位  $E_i$  が節点への水の流しやすさの指標と考えられるならば、式 (12) から、 $\sum R_{mn}$  が小さいほど水理的にその需要点が有利と考えられ、この値を基準に供給していくことは自然であろう。また、需要点  $i$  の  $\sum R_{mn}$  としては、供給点  $k$  から需要点  $i$  に至るいくつかの径路のうち、最も  $\sum R_{mn}$  の小さい径路の値を選ぶことも自然であろう。すなわち、式 (9) の  $\min R_{ki}$  である。

本方法の妥当性を検証するために 図-7 の例題管網<sup>8)</sup>を用いて  $\min R_{ki}$  と管網解析から求まる節点エネルギー位を比較した。図-8 は各供給点から単独で送水したとき（供給点のエネルギー位はすべて 60 m）の各節点エネルギー位と最小抵抗  $\min R_{ki}$  の相関を調べたものである。両者は片対数平面上ではあるが、相関が認められ、SRM の妥当性のある程度示していると考えられる。

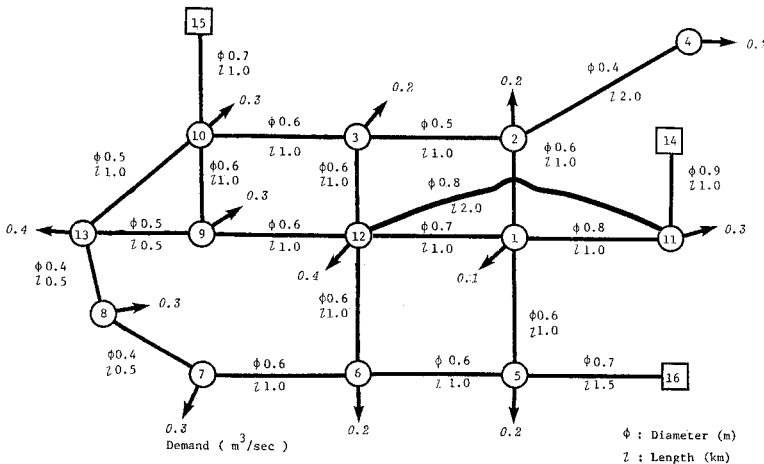


Fig. 7 An Example Network for SRM.

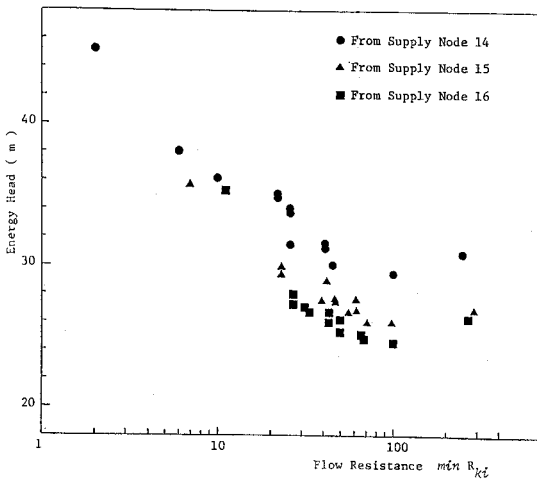


Fig. 8 Relation between Flow Resistance  $\min R_{bf}$  and Energy Head for Model Network Shown in Fig. 7

SRM による評価結果は、総供給量と総需要量の比に大きな影響を受ける。総供給量が総需要量に比べてはるかに大きいときには、厳密には最小能力の供給点が必要を賄えれば、SRM による結果は、ネットワークの連結性のみを考えた方法と一致する<sup>5), 9), 11)</sup>。

### 6. 大規模水道システムに対する試算例

大規模水道システムの例として東京都水道システムのうち、おもに区部に送配水している幹線網に対して信頼度を試算した<sup>注3)</sup>。これらの結果は埋設管被害率の推定、供給戦略の設定等で多くの仮定を設けており、あくまで1つの評価例とみなすべきである。また、送配水幹線網

注 3) 本試算で対象としたシステムは現在供用中のもので、昭和 62 年を目標に計画・建設されている第 4 次利根川系水道拡張事業による施設、管路は含まない。

のみを対象としているため、得られた信頼度は各配水区域ごとの潜在的な供給ポテンシャルと解釈すべきである。

想定地震動として関東地震クラスとさらに強い地震動の 2 つのレベルを考えて埋設管被害率を推定し、以下のような評価を行った<sup>注4)</sup>。ここでは、浄水場、給水所等の節点の被害および停電による施設の機能停止は考えない。

1. 特に重要な幹線網に対する巨視的な評価 (PFM-I による)。
2. 前項 1 の幹線網にレベルのやや低い幹線網を加えたネットワ

ークに対する、地域的に詳細な信頼度の評価 (SRM による)。

#### (1) 埋設管被害率と枝の被害率

想定地震による当該地域の地震動強さに対応して標準的な被害率  $R_f$  (箇所/km) を過去の経験等を参考にして定める。ここでは、久保・片山による埋設管被害率と地震動最大加速度値との関係<sup>10)</sup>を用いることとし、一般的な沖積地盤に 2 m 前後の深さに埋設された鋳鉄管の被害率を  $R_f$  とする。管路要素  $e$  の被害率は、

$$R_{fm}^e = C_g^e \cdot C_p^e \cdot C_d^e \cdot R_f \dots\dots\dots (13)$$

により定める。 $C_g^e$ ,  $C_p^e$  および  $C_d^e$  はおのおの、地盤条件、管種および埋設深さによる補正係数であり、過去の被害資料等を参考にして工学的判断を加えて定める。

式 (13) の被害率をもとに隣接節点間を結ぶ枝に 1 箇所以上の被害が発生する確率、すなわち枝の被害率  $P_f$  を求める。被害は管路に沿ってポアソン分布に従って発生すると仮定する。1 つの枝は条件の異なる地盤を通過したり、途中で管種や埋設深さが変化したりする。注目する枝の  $e$  番目の要素の長さを  $L^e$  (km) とすれば、被害率は、

$$P_f = 1 - \exp(-\sum_e R_{fm}^e \cdot L^e) \dots\dots\dots (14)$$

で与えられる。ここで総和は枝内のすべての要素についてとる。同一路線に 2 条の管路が埋設されているときは並列システムとして  $P_f$  を評価する。

地盤条件による補正係数  $C_g$  は久保・片山による東京都区部の埋設管被害補正係数をそのまま用いた<sup>10)</sup>。地盤は A, B, C の 3 種に分けられ、補正係数  $C_g$  はおのおの、2.0, 0.9, 0.4 である。管種による補正係数は、最近の被害例であること、また対象延長が大きいことを考

注 4) 文献 3), 11) では、PFM-II を用いることにより平均的な復旧過程の予測も行っている。

Table 1 Buried Depth Factor  $C_d$ .

Buried Depth	Less than 5 m			$C_d$
	Greater than 5 m	Buried in diluvial layer	$C_p=0.4$ $C_p=0.9$ $C_p=2.0$	1.0 0.4 0.44 0.2
		Buried in alluvial layer	$0 \leq Z < 0.3$ $0.3 \leq Z < 0.6$ $0.6 \leq Z^* < 1.0$	1.0 0.7 0.4

\*  $Z = (\text{Buried Depth}) / (\text{Depth of Alluvial Layer})$

慮して宮城県沖地震による宮城県下の水道管被害率を参考にして決定した<sup>3)</sup>。铸铁管を1.0とし、ダクトイル铸铁管0.2、アーク溶接鋼管0.1、非常に古いガス溶接鋼管2.5と工学的判断も加えながら割り当てた。対象としている幹線網にはシールド工法により地下10~30m程度に埋設されている管路がある。これらの管路については1層地盤内で直線的に変化する地震動振幅の増幅を仮定し、表-1のように $C_d$ の値を定めた<sup>3),11)</sup>。

図-9にはおもな送配水幹線網の $R_f=0.16$ および0.45の場合の管路被害確率を示す。 $R_f=0.16$ は関東地震の東京市の铸铁本管の平均被害率である。図-9で節点10~3, 3~17, 14~17等の間はシールド工法により深く埋設されている部分が多い。東村山浄水場~20はアーク溶接鋼管が用いられている。また、境浄水場~18は $C_p=2.5$ のケースである。式(14)からわかるように枝の被害確率は被害率補正係数ばかりでなく、枝の長さによって大きく影響される。

(2) 巨視的な信頼度評価

区部の送配水幹線網でも特に重要な部分のみを取り出し、PFM-Iにより巨視的な信頼度を評価した。対象とした管網と枝の被害確率は図-9に示されている。図中2重丸の節点は給水所であり、節点エネルギー位が与え

られる。PFM-Iによる評価のモデルネットワークを図-10に示す。節点2および4は単なる分岐節点であり、隣接する枝の枝流量を厳密に与えることは困難であるが、PFM-Iの評価で大きな誤りを犯さないような値を仮定することは可能である。図-10に与えられた各点の需要量は通常時の平均的な値である。

震災時の水供給戦略に関しては具体的な情報を得ることができなかったため、今回の試算例では4.の(4)に示した2つの戦略をそのまま採用する。

需要量の大小を2次的な戦略として組み込んだ理由は、「まとまった大需要地域に給水するか、散在した小需要地域に給水するか」という戦略もあり得るのではないかとこの発想に基づくものであるが、むしろ戦略の選択により供給信頼度がどの程度影響を受けるかを試算してみるのがおもな目的であり、必ずしも現実的な戦略と考えているわけではない。

図-11は上記戦略Case1をとったときの特定の被災パターンに対するPFM-Iによる機能評価の結果を示したものである。この例では朝霞浄水場と上井草給水所を結ぶ2700mmのダクトイル铸铁管に被害が発生し、この間が送水不能となった場合を想定している。図-11には機能評価の結果求められた枝の流向、流量および各需要点で得られた水量が示されている。枝に示した流量のうち下線を施したものは、その枝の枝流量一杯に流れていることを示す。各節点では流入量と流出量のバランスが保たれていることに注意されたい。戦略Case1をとっているため需要量の大きい節点15, 18, 19等は優先的に送水されている。これにより、枝17→14, 境浄水場→28が飽和してしまうため、需要点13と11はまったく供給されておらず、需要点14では水量不足をきたしている。これには、20→13方向の送水が不可能な機構となっていることも影響している。ところが、

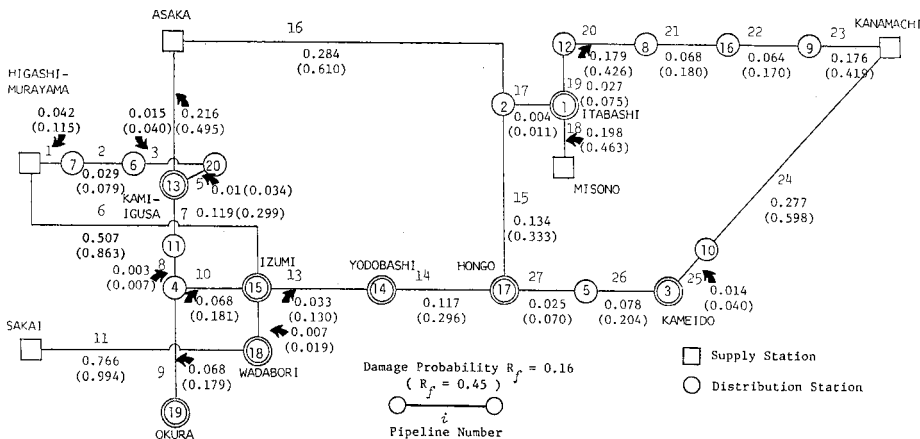


Fig. 9 Trunk Network of Tokyo and Pipeline Damage Probabilities for PFM-I.



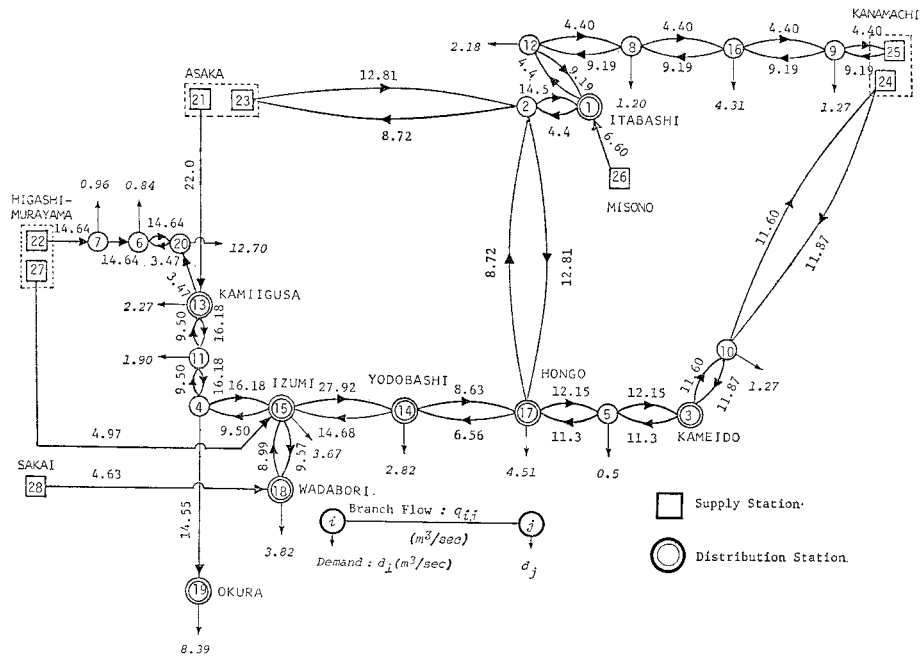


Fig. 10 Model Network for PFM-I (Trunk Network of Tokyo).

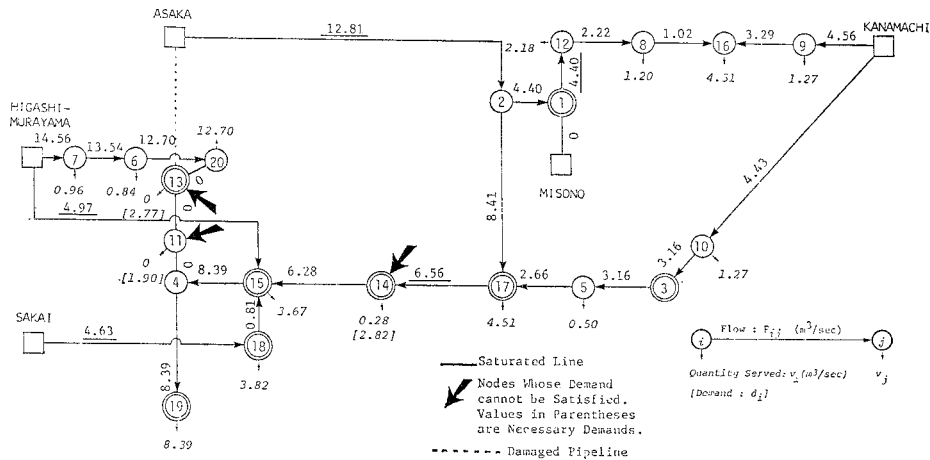


Fig. 11 Water Flow by PEM-I (CASE 1 STRATEGY)  
—When Pipeline between Asaka and Node 13 is Damaged.

まったく同じ条件のもとで Case 2 の戦略を採用すると、このシステムでは 2 番目に需要量の大きい節点 19 のみが水量不足 (14% しか供給されない) をきたし、他の需要点はすべて必要量を満足させられる。

PFM-I の評価の結果得られる水の流れは、実際に行われる配水調整の結果とは異なる。たとえば、図-11 で、三圓浄水場からはまったく供給されていない段階ですでに最終的な状態に達している。しかし、PFM-I は、あくまでも供給の可能性を判定するものであるの、その目的は達せられていることになる。

図-1 のモンテカルロ・シミュレーションの流れに沿

って信頼度を評価した結果を 図-12 (a), (b) に示す。シミュレーション回数は 500 回であり、標準被害率は  $R_f=0.16$  を仮定している。図中、信頼度を示していない地域は、このネットワークによらず浄水場から直接配水管を通して送水される地域である。図-13 は 500 回のシミュレーションのそれぞれで得られた被災管網において、いくつの枝で送水不能の状態が同時に発生したかを示す頻度分布である。3~4 の枝が同時に被災する場合が最も多いこと、また、500 回のうち 5 回は送配水幹線網にはまったく被害が発生しなかったことがわかる。同図には参考のために  $R_f=0.45$  の場合も示す。

図-12 (a), (b) はおのおの, 供給戦略として Case 1, Case 2 を選んだ場合に対応している。地域的な供給信頼度の差がネットワークの物理的特性のみならず, 供給戦略に強く依存することがわかる。大蔵給水所から給水される城南区域はこのシステムで2番目に需要量が大いいため, 戦略の違いによる影響が顕著である。しかし, 全供給エリアに対する供給水量の期待値  $Q_T$  は供給戦略にほとんど影響されず一定である。全需要点の需要量の

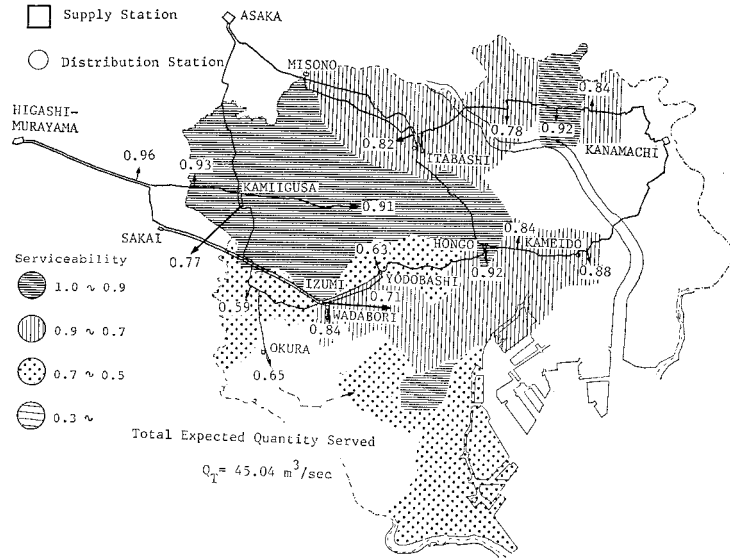
和に対する供給水量期待値の比は約0.8である。

(3) 地域的信頼度のより詳細な解析

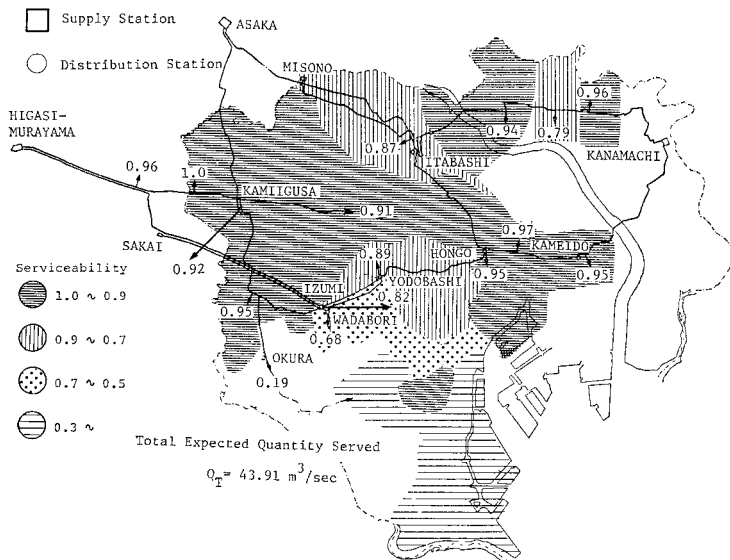
前節で示したとおり, PFM-I では地域的にはごく大雑把な信頼度の評価しか行えない。そこで, PFM-I のネットワークに規模の小さい浄水場およびレベルのやや低い幹線を付加し, 地域的により詳細に信頼度をみる解析を行った(図-14 参照)。

この場合, 評価法としては必然的に SRM となるが, PFM-I のように量的に厳密な評価は行えず, この結果はあくまで信頼度の地域差を相対的に把握するためのものと理解すべきである。各管路の流向は任意に与えることができるが, ここではすべての枝が両方向に送水可能とした。地域的な信頼度の差をより明確にするために  $R_f=0.45$  とし, 需要量も PFM-I で与えたものの1.3倍を与え解析した。付加された部分の枝被害確率は文献(11)を参照されたい。500回のシミュレーションによる信頼度評価結果を図-14に示す。供給戦略としては, 水理的条件の有利さのみを考えた。各シミュレーションにおいて同時に被災する枝の数は, この場合, 平均して15本程度である。

図-14 をみると信頼度の地域的な傾向は, PFM-I の結果とはほぼ一致している。東村山浄水場から直接送水されている北西部(上井草付近)の信頼度が相変わらず高いが, この管路にアーク溶接鋼管が用いられているためである(図-9 参照)。一方, この管路は下流に行くに従い径が細くなるため, 下流地域では朝霞一本郷を結ぶ幹線に近いにもかかわらず信頼度が低い。これは, 水理的に有利な需要点を優先するという SRM の戦略の影響で, 朝霞, 三園浄水場から来る水も, これら需要点にはあまり送水されず, 幹線上にある本郷, 淀橋給水所方面に優先的に送られてしまうからである。本郷, 淀橋給水所は, 幹線上にあること, およびシステム内で中心的な位



(a) Case 1 Priority is Given to Nodes with Greater Demand If Possible Flows are the Same ( $R_f=0.16$ , 500 Simulations).



(b) Case 2 Priority is Given to Nodes with Smaller Demand If Possible Flows are the Same ( $R_f=0.16$ , 500 Simulations).

Fig. 12 Serviceability of Tokyo Network by PFM-I.

置を占めることから供給信頼度は高い。城南地域は、砦上、砦下および長沢の各浄水場の能力が小さいこと、重要幹線網から遠いこと、比較的古い管路が残っていることなどの理由で供給信頼度が低くなっていると思われる。

7. あとがき

大規模送配水幹線網の地震時信頼度を評価する方法

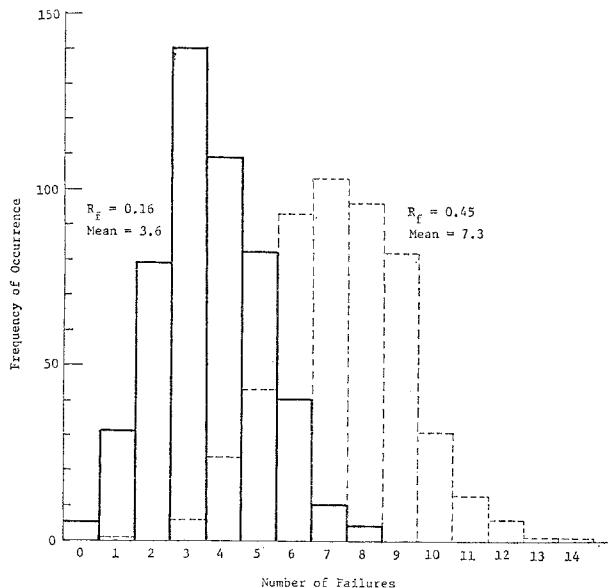


Fig. 13 Frequency Distribution for Simultaneous Failures in 500 Simulations.

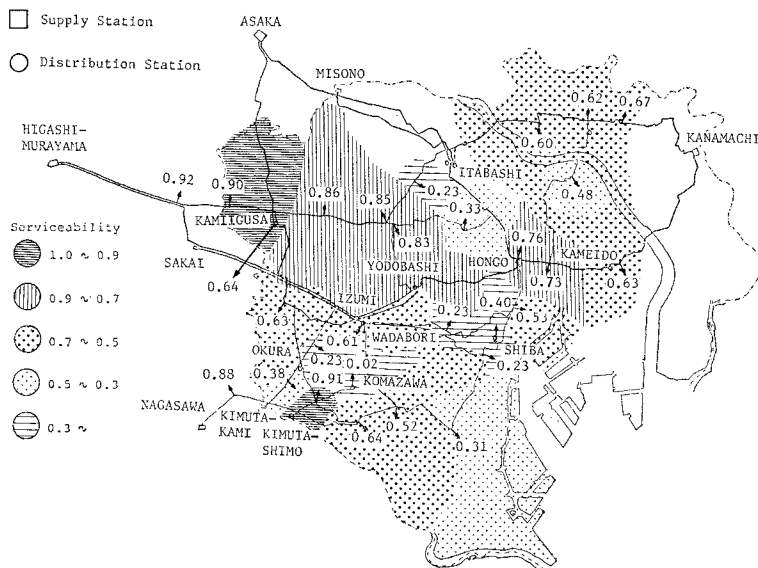


Fig. 14 Serviceability of Tokyo Network by SRM ( $R_f=0.45$ ,  $d_i'=d_i \times 1.3$ , 500 Simulations).

を提案した。可能流量法-I (PFM-I)、最小抵抗法 (SRM) の2つの方法を紹介したが、これらは、対象とするシステムの特性により使い分けられる。これらは、ネットワークの連結性、管路性能、需要量と供給量のバランス等の物理的特性のみならず、地震時の水供給戦略をも考慮できる実際的な方法である。簡単な例題ネットワークにより各方法の妥当性、有用性を検討した後、東京都の送配水幹線網の地震時供給信頼度を試算した。

本論文で提案した機能評価法は、システムの改善、応急給水計画の立案、防災拠点の配置等、実際の水道システムの地震防災に役立つ情報を引き出し得る能力をもつものと思われる。これらの方法の大きな特徴は、任意の供給戦略を考慮できる点である。本文で示したように供給戦略の供給機能へ与える影響は大きく、上記のような事前対策のみならず地震時の水運用方法もあらかじめ決めておかなければならない。ここでは、最も単純な供給戦略を仮定して東京都システムの信頼度を試算したが、上記目的のためにはより現実的な供給戦略を想定して比較検討しておく必要がある。

最後に、本論文のみならず、この種の研究で今後問題となる事項を列記しておく。これらの解決のためには実際の水道の運用に携わっている技術者との密接な協力が不可欠であることを付記しておきたい。

(1) 解析の各段階で多くの仮定を設けているが、これらの妥当性の検討。特に埋設管被害率をいかに適切に与えるか。

(2) 現実的な地震時水供給戦略としてどのようなものが考えられるか。

(3) 浄水場、給水所等節点の被害および停電による機能停止は、あるシステムでは重大な影響を及ぼす。節点被害確率をいかに与えるか。

(4) 東京やごく一部の大都市の水道システムでは PFM-I による評価が可能であるが、大多数を占める中小システムの信頼度評価は SRM によらねばならない。SRM をより精密にすることも必要である。

謝辞：本論文は、磯山が東京大学に提出した学位論文の一部を取りまとめたものである。研究の遂行にあたり東京大学名誉教授（現 埼玉大学工学部教授）久保慶

三郎博士から数々の有益なご助言をいただいた。また、東京都システムのモデル構築にあたっては、東京都水道局のご協力を得た。ここに記して深甚なる謝意を表する。

### 付録：最大可能流量 $f_{ki}$ を求めるサブルーチン

```

00001 C MAXIMUM POSSIBLE FLOW AND ITS ROUTE
00010 SUBROUTINE PFAG2(N,M,NP)
00020 DIMENSION M(30,30),NF(30,30)
00030 DO 10 I=1,N
00040 DO 10 J=1,N
00050 NF(I,J)=1
00060 10 CONTINUE
00070 DO 20 K=1,N
00080 DO 30 I=1,N
00090 DO 30 J=1,N
00100 NH=MINO(M(I,K),M(K,J))
00110 IF(NH.LE.H(I,J)) GO TO 30
00120 H(I,J)=NH
00130 NP(I,J)=NF(K,J)
00140 30 CONTINUE
00150 20 CONTINUE
00160 RETURN
00170 END

```

$N$ : 全節点数

$M(I, J)$ : 節点  $I, J$  間の枝流量  $q_{ij}$  が入り, Return の時点では最大可能流量  $f_{ij}$  が入る。ただし,  $M(I, I)=0$ 。

$NP(I, J)$ :  $I$  から  $J$  に至る最大可能流量径路上の  $J$  の1つ手前の節点番号。

#### 参考文献

- 1) 片山恒雄・磯山龍二：ライフラインの地震防災，季刊ラム，No. 76，1980年4月。
- 2) 片山恒雄・磯山龍二：ライフラインの地震防災—考え方と現状報告，生産研究，32巻6号，1980年6月。
- 3) 磯山龍二：Seismic Performance Evaluation of Urban Utility Systems，東京大学学位論文，1980年12月。
- 4) 片山恒雄・増井由春・磯山龍二・甚内郁郎：1978年宮城県沖地震による都市供給施設の被害と復旧—上水道施設，その1，その2，生産研究，31巻4号，6号，1979年4月，6月。
- 5) 川上英二：地中埋設管システムの地震時の機能の安全性の評価方法に関する研究，東京大学学位論文，1978年12月。
- 6) Shinozuka, M. and R.Y. Tan: Estimation and Optimization of the Serviceability of Underground Water Transmission Network Systems under Seismic Risk, Proceedings of Review Meeting of the U.S.-Japan Cooperative Research on "Seismic Risk Analysis and Its Application to Reliability-Based Design of Lifeline Systems", Gakujutsu Bunkan Fukyu-kai, Jan., 1981.
- 7) 日本オペレーションズ・リサーチ学会：ネットワーク構造を有するオペレーションズ・リサーチ問題の電算機処理に関する基礎研究，1973年3月。
- 8) 高桑哲男：配水管網の解析と設計，森北出版，1978年8月。
- 9) 田村重四郎・川上英二：ライフラインのネットワークシステムの耐震性の一評価方法について，生産研究，30巻7号，1978年7月。
- 10) 久保慶三郎・片山恒雄：地下埋設管の被害，東京都区部における地震被害の想定に関する報告書，東京都防災会議，1977年。
- 11) Ryoji Isoyama and Tsuneo Katayama: Reliability Evaluation of Water Supply Systems During Earthquakes, 東京大学生産技術研究所「生研報告」，第30巻，第1号，昭和57年2月。(1981.7.8・受付)