

(42) 上水道システムの地震時信頼度評価法

東京大学生産技術研究所 学生員 磯山 龍二
 東京大学生産技術研究所 正 員 ○片山 恒雄

1. まえがき

都市の日常生活における水道施設の重要性は極めて高く、震害によって水道施設の機能が低下すれば、大きな社会的混乱を招きかねない。水道施設の地震防災を考えるにあたっては、震害が水供給の機能に及ぼす影響をできるだけ定量的に予測し、これに対しあらかじめ適切な対策を立てておくことが重要である。水道施設は多くの構成要素からなるネットワーク・システムであるから、震害による機能低下の予測はシステムとして考えなければならぬ。与えられた地震動の強さに対して、ネットワーク内の各種施設の被害を確率的に与えることは難しく、地震時機能の評価は確率的な被害発生モデルを考えたシミュレーション解析とならざるをえない。筆者らは、このようなシミュレーション解析において、大規模な水道ネットワークの被災時機能を評価する実用的な手法を開発してきた⁽¹⁾。ここでは、それらの手法の一つである可能流量法I (PFM-I) を用いて行った東京都西部の送配水幹線網の地震時信頼度の試算結果を示し、このような解析からどんな情報が得られ、またその結果が防災対策にどんな意味を持つかを考えてみたい。現時点では、埋設管の被害率の予測や、震災時にとられるであろう水供給の戦略的仮定などは極めて単純化されており、試算結果はあくまでも例題的な意味合いの強いものと考えておく必要がある。

2. 機能評価の方法

図1は地震時信頼度評価の方法の概略を示したものである。(1)はじめに検討の対象とする地震を想定し、当該区域内の地震動強さの分布を仮定する。(2)解析の対象とする管路網を節点および節点間を結ぶ管路からなるネットワークにモデル化する。このネットワークには、各供給点の供給量、各需要点の需要量、および節点間送水可能な流量(管径・管種・管路延長・両節点のエネルギー位により定まる)を与える。(3)隣接節点間を結ぶ各管路に対し、地震動の強さ・地盤・管種・埋設の深さ・管路長を考慮して管路被害確率を求める。今回の解析では節点の被害は考えていない。(4)管路被害の発生は確率的であるとの仮定のもとに、与えられた条件下で発生する被害パターンを1つ計算機で作り出す。被災管路を両側バルブの閉止によって管網から切り離すことにより、1つの被災ネットワークが得られる。(5)被災ネットワークの供給機能を評価する。(6)上記(1)～(3)のもとで上記(4)により確率的に発生させた多数回の被災ネットワークに対し、上記(5)の機能評価を繰り返して実施する。(7)十分な回数(100回)のシミュレーション結果が得られたら、必要な諸量を計算して解析を終了する。

上述のように、信頼度の評価法全体は想定地震に対するモンテカルロシミュレーション法であり、ここで言う「機能評価法」は上述の(5)にあたる部分を指す。可能流量法I (PFM-I, Possible Flow Method - I)では、供給点と需要点の連結性に加えて、供給点から需要点へ送水可能な最大流量やさらには震災時に行われるであろう人為的な配水調整の影

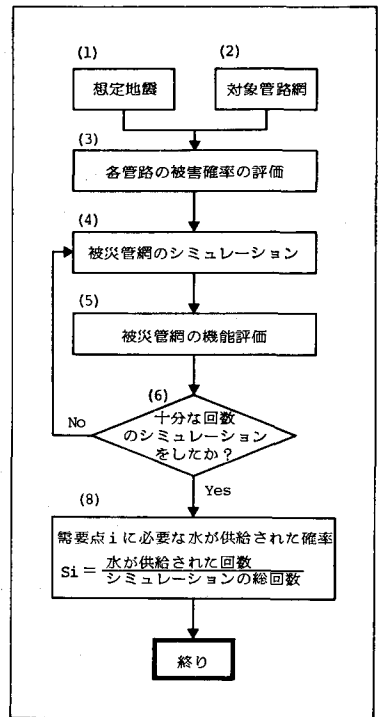


図 / 供給信頼度評価の概略の流れ

響を組込んだ機能評価が可能である。大規模な送配水幹線網の節点多くは浄水場や給水所であり、各種の配水制御ができる。さらに管網中には多数のバルブがあり、これらの操作を節点にかかるコントロールと組み合わせることにより、同一の被災ネットワークに対しても無数の管路制御の状態が考えられるため、通常の管網解析法を用いたネットワーク機能の評価は不可能である。震災時にどのような配水調整を行うつもりかを明確に規定している水道事業者は現時点ではほとんど無いと思われるが、一般には、被災ネットワーク内の水の流しやすさ、末端配水管網の被害程度、需要の性質と需要量の大小などが考慮されることになる。本報告で紹介するような供給信頼度の解析によって、各種の供給戦略の効果や得失を事前に検討しておくことは、震災時の混乱を最小限に抑えるために有効であろう。

3. 埋設管の被害率と管路の被害確率

埋設管被害率は管種、埋設条件(地盤と埋設深さ)および地震動強さが与えられたときに、その管の延長1kmあたりに発生する被害の個数を示す量であり、過去の地震による埋設管被害のデータに工学的判断を加え、ある管路要素*j*に対し

$$R_{fm}^j = C_g^j \cdot C_p^j \cdot C_d^j \cdot R_f$$

により定める。ここに C_g^j , C_p^j および C_d^j はそれぞれ地盤条件、管種および埋設深さによる補正係数であり、

R_f は地震動の強さに依存する標準被害率(被害箇所数/Km)である。

埋設管被害率を基に、隣接節点間を結ぶ管路に1箇所以上の被害が発生する確率、すなわち管路の被害確率 P_f を求める。管の被害は管路上にポアソン分布に従って発生すると仮定する。1つの管路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。注目する管路の*j*番目の部分の長さを L^j (km) とすれば、被害確率は

$$P_f = 1 - \exp\left(-\sum_{j=1}^n R_{fm}^j \cdot L^j\right)$$

で与えられる。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。

4. 機能評価例

図2に東京都区部の送配水幹線網と管路の被害確率を示す。標準被害率としては $R_f = 0.16$ (関東地震の東京市相当)

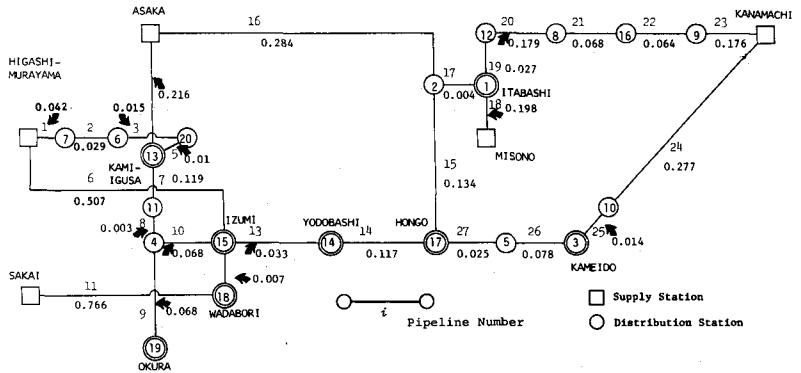


図2 東京都区部の送配水幹線網と管路被害確率

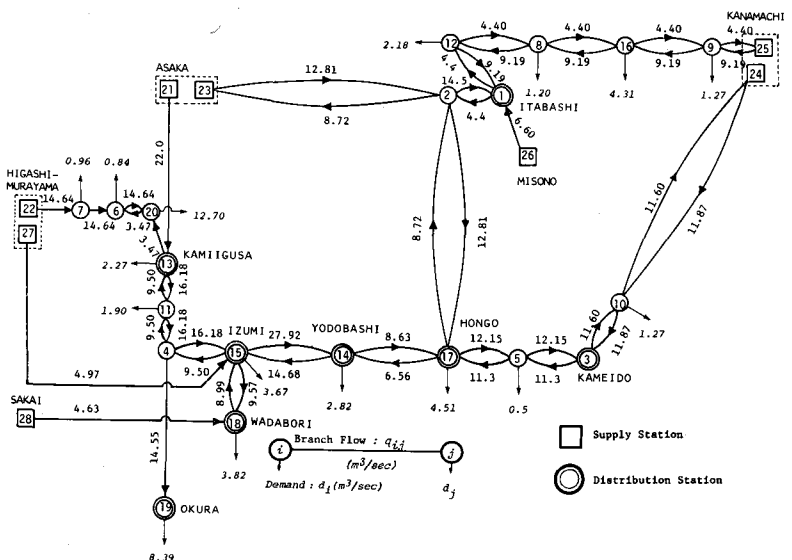


図3 機能評価のためのモデルネットワーク

を用いた。図3は機能評価のためのモデル・ネットワークである。許点間で両方向に送水可能なものは、配水調整の方法によりいずれの流も可能であることを示す。この場合、ポンプ能力等により両方向で送水可能な流量は一般に異なる。図3のモデルの設定においては、東京都水道局技術者の判断を大幅に参考にした。

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、今回の試算例では以下の簡単な基準に従った。(1)可能流量を基に供給点から水学的に送りやすい需要点に優先して送水する。(2)水理的条件が同じときには、需要量の大きい節点(Case1)または小さい節点(Case2)に優先して送水する。前記(2)の判断基準は、「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」という戦略もありう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って供給信頼度などの程度影響を受けるかを試算してみるのが主な目的であり、必ずしも現実的な戦略を考えているわけではない。

図4は上記Case1の戦略をとるとき、特定の被災パターンに対して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7ヶケイル鋼鉄管路に被害が発生し、この間が送水不能となった場合を想定している。図4には機能評価の結果として求められた各管路の流向、流量および各需要点で得られた水量が示されている。管路流量のうち下線もほどこしたものは、その管路の可能流量一杯流れていることを示す。供給戦略としてCase1を考えているので、需要点15, 18, 19等には優先的に送水される。これにより、管路17→14, 28→18の流量が可能流量に達してしまうので、需要点13と11は全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。PFM-Iの評価の結果得られる水の流は、実際に行われる配水調整の結果とは異なる。

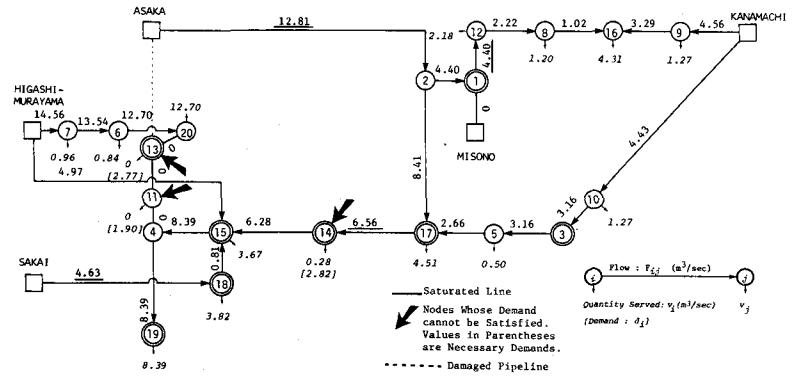


図4 管路被害が与えられた時のPFM Iによる機能評価例

例えば、図4の例では、三園浄水場から全く供給されていない段階ですぐ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ため、その目的は達せられていることになる。

5. 供給信頼度の評価

想定地震に対して求められた管路被害確率(図2)を基に、 M_s 個の被災ネットワークを計算機でシミュレートし、それぞれの被災ネットワークについて各需要点が供給されたかどうかをPFM-Iにより判定する。需要点*i*で必要な需要量が完全に満足された回数を*N*とすると、需要点*i*の供給信頼度を

$$S_i = \frac{N}{M_s}$$

で定義する。今回の解析では、東京都西部では地震動強さに大差はないものと仮定して $R_f = 0.16$ (箇所/Km) としたが、地盤条件による被害率の差は補正係数 c_g で考慮している。

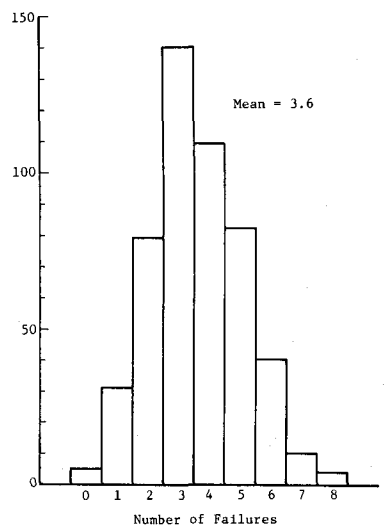


図5 管路被害の度数分布 (500回のシミュレーション)

図5は500回のシミュレーションのそれぞれで得られた被災ネットワークにおいて、いくつかの管路（隣接節点をつなぐ管路）で送水不能の状態が同時に発生したかを示す頻度分布図である。3~4の管路が同時に被災する場合は最も多いこと、また、500回のうち5回は幹線送配水管網には全く被災が発生しなかったことがわかる。

図6および図7は、全く同一の被災ネットワーク群 ($M_5 = 500$) に対し、供給戦略として Case 1, Case 2 を選んだときの供給信頼度を示したものである。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。(しかし、全供給エリアに対する供給水量の期待値は、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。

6. あとがき

本報告で示した機能は、巨視的な潜在的供給可能性を対象としたものであり、ここで扱った需要点の先には配水管や給水管が密に布設されている。こからの管には当然かなりの被害が発生するから、図6や7の供給信頼度は各末端需要家での供給信頼度を指すものではない。この信頼度評価法は基本的に妥当であると考えるが、解析の途中では、いくつかの仮定をわいているし、埋設管の被害率そのものにも不確定な要素が多い。今後解決すべき問題点も多いと思われるが、実際に水道の運用に携わっている技術者の方々からの忌憚のない御意見を特に期待したい。

参考文献 (1) R.Isoyama: "Seismic Performance Evaluation of Urban Utility Systems", Dr. Thesis, Univ. of Tokyo, Dec. 1980. (2) R.Isoyama and T.Katayama: "Seismic Performance Evaluation of Water Supply Systems", Review Meeting of the U.S.-Japan Cooperative Research on 'Seismic Risk Analysis and Its Application to Reliability-Based Design of Lifeline Systems', Honolulu, Hawaii, Jan., 1981. (3) R.Isoyama and T.Katayama: "Practical Performance Evaluation of Water Supply Networks during Seismic Disaster", to be presented at ASCE Specialty Conference on Lifeline Earthquake Engineering, Oakland, California, Aug., 1981.

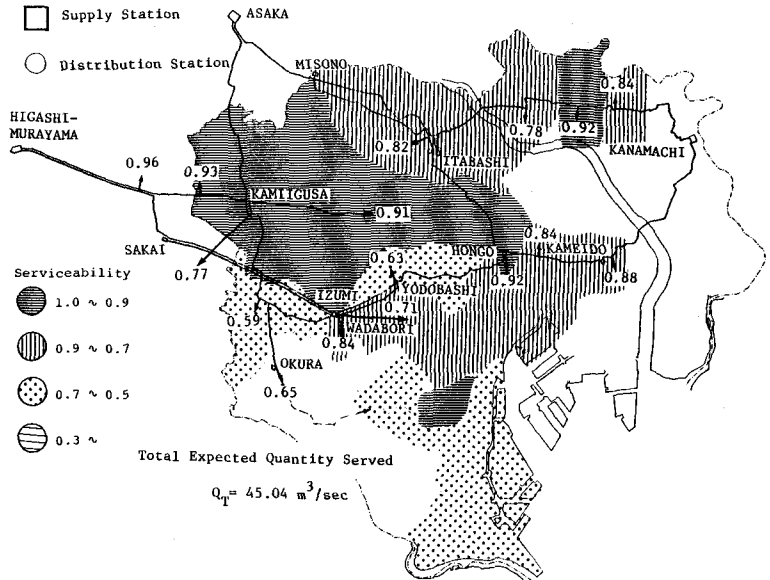


図6 供給信頼度 — 供給戦略として Case 1 を採用した時

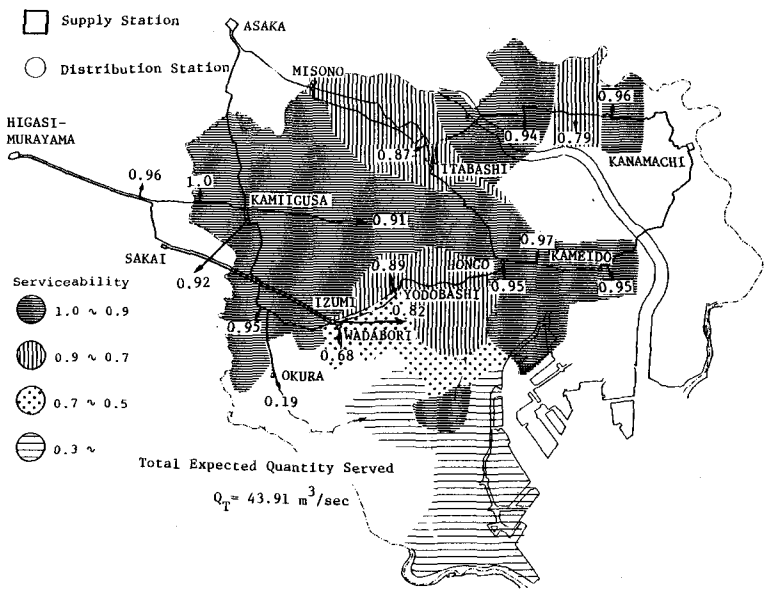


図7 供給信頼度 — 供給戦略として Case 2 を採用した時