I-215　上水道システムの地震時機能の評価

東京大学大学院　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　地震が起って，上水道システム要素に被害が発生した時のシステム機能の簡便な評価（各需要点で供給されるか否か）の方法を示す。ここで，機能とは，被害箇所の両側のバルブを締めた後，または，その後のバルブ操作によって配水調整が行われた時点の機能を指す。この方法は，供給点，需要点の連結性ばかりでなく，水道システムの特性（管路の容量等）をも出来るだけ取り入れることを目指している（機能評価I）。さらに，この条件に加えて，地震時の水運用戦略とでも言ったものをも考慮した評価（機能評価II）の可能性をも示す。これらの方法は，要素被害がある確率で与えられた時のモンテカルロ・シミュレーション，あるいは，システム信頼性理論を用いた評価法に取り入れられる。説明の都合上，上水道システムを対象としているが，適当な修整を加えることによって，基本的には他の供給システムにも適用可能と考えられる。

2．機能評価I　図1に示すように，供給点，需要点，これらの節点を結ぶ送水管・配水本管からなるネットワークを考える。水は需要点（配水本管の水抜き点とする）から取り出され，より細かい配水管網により需要家に供給されるが，ここでは配水本管のレベルまでしか考えない。問題は，ある被害の組が与えられた時に，各需要点が供給されうるかどうかの判定である。この条件を以下に示す。――――(a)供給点と需要点の連結性（流れの方向も考える）　(b)需要点で，必要な水量が得られる圧力が保持されるか　(c)可能供給量≧全需要量――――　水理学的にこの解を得ようとすれば，管網解析を行わねばならない。しかも，絶対水量が不足していて供給可能な節点の組合せがいくつもある場合には，各々について管網計算を行ない，最適な節点の組を選ぶことになる。しかしながら，このような方法ではシステム信頼性理論を用いる解析的な方法はもとより，モンテカルロ法にも取り入れ難い。また，実際の断水域設定には，後に述べるように人為的な要因も大きく影響すると考えられ，少々厳密性に欠けても，簡便で概略を推定する方法で十分と思われる。以下にこのような考えの一例を示す。

1) 管要素 ij に流しうる最大の流量 q_{ij} (m³/sec) を与える。管内の流れをHazen-Williamsの式で表現すれば，

$$q_{ij} = 0.27853 C_{ij} \cdot D_{ij}^{2.63} (H_i - H_j)^{0.54} / L_{ij}^{0.54} \qquad (1)$$

ここで，C_{ij}：流速係数，D_{ij}：管径(m)，L_{ij}：管路長(m)，$(H_i - H_j)$：ij 間の可能な動水位差である。

2) 供給点から需要点 i に流しうる最大の流量を求める。これは，ネットワーク理論における最大フローを求める問題である。[1] この最大フローを f_{si} とし，供給点 s から需要点 i への水の供給され易さの指標とする。もちろん，f_{si} が節点 i の最低必要水量 d_i に達しなければ供給されない。――→ $f_{si} \geq d_i$

3) f_{si} を大きい順に並べ，j 番目に大きなものを f_{si}^{j} とする。節点 i が，供給点と連結された節点の中で j 番目に供給され易いと考えるわけである。ただし，f_{si} に同じ値のものがいくつかあった場合問題であるが，ここでは，対応する d_i の大きいものから順序づけるものとする。f_{si}^{j} に対応する節点 i の最低必要水量を $d_i(f_{si}^{j})$ とおき，$d_i(f_{si}^{j})$ の j についての和を，供給点の最大可能流量 Q_s を超えない範囲で最も大きくなるまでとる。すなわち，

$$Q_m = \sum_{j=1}^{m} d_i(f_{si}^{j}) \qquad (2)$$

を，$Q_s \geq Q_m$ の条件の基で最大にし，その時用いた i を供給可能とする。供給点が2つ以上ある場合は，後の例で説明する。

図1のネットワークについて，機能評価Iの例を示す。各要素，節点に与えた q_{ij}，d_i は，まったく仮想的な値で，あくまで例題であることをお断りしておく。節点間に方向が逆で一対のアーク（管路要素）のあるものは

，方向によりq_{ij}が異なるもので，実際には１本の要素である。節点間に１方向のアークしかないものは自然流下を考えている。

2)の最大フローf_{si}を求める時，ここでは，簡単な方法で近似的な値を計算した。供給点Sから需要点iに至る１つのパスにおいてq_{kl}の最少のものを選ぶ。Sからiに至る全てのパスについて，この最少のqを求め，その中の最大のものを$S\rightarrow i$のf_{si}とする。すなわち，ネットワークは考えずに１つのパスのみで供給するとした時の最大フローを求めていることになる。

管路B→6が被害を受けてBからの供給が断たれたとする。Aから各節点への最大フローf_{Ai}を表１(a)に示す。節点５，６は先の(2)の条件を満たしていないから除外する。(2)式を計算すると表のようになり，節点５，６が断水する。（節点７，８のどちらを取るかの問題は残るが，これは後に述べる配分の問題と考えられる）断水の様子を図２(a)に示す。次に図２(b)に示すように管路を切断してみる。この時のf_{Ai}，f_{Bi}を表２(b)に示す。まず，f_{Ai}から考えると，(2)の条件から節点５，６，８が除外される。残りの５節点について式(2)を計算すると，$Q_5 \leqq Q_A$を満足する。f_{Bi}でも，(2)の条件から節点１，２，５，８が除外される。また，Aから供給されうる点も除外する（＝の所）。結局，節点６のみが残り，$Q_1 \leqq Q_B$を満足する。断水域は図２(b)に示すようになる。

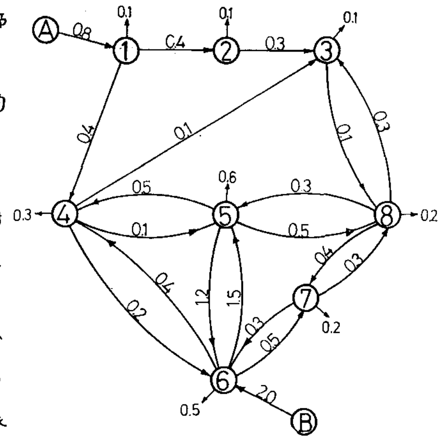


図1　ネットワークの例：A,Bは供給点
数値はq_{ij}とd_i

表1　2つの切断ケースの機能評価

(a) B→6の切断

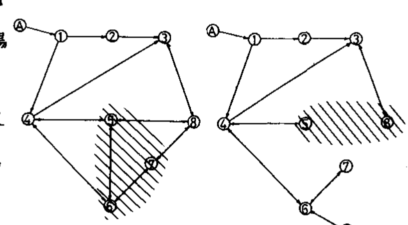
Node	1	2	3	4	5	6	7	8
f_{Ai}	0.8	0.4	0.3	0.4	~~0.2~~	~~0.2~~	0.2	0.2
d_i	0.1	0.1	0.1	0.3	0.6	0.5	0.2	0.2
eq. (2)	$\Sigma d_i = \underset{(1)}{0.1} + \underset{(4)}{0.3} + \underset{(2)}{0.1} + \underset{(3)}{0.1} + \underset{(8)}{0.2} = 0.8 \leqq Q_A = 0.8$							

(b) 5⇄8，5⇄6，7⇄8の切断

Node	1	2	3	4	5	6	7	8
f_{Ai}	0.8	0.4	0.3	0.4	~~0.1~~	~~0.2~~	0.2	~~0.1~~
f_{Bi}	~~0.0~~	~~0.0~~	~~0.1~~	~~0.4~~	~~0.1~~	2.0	~~0.3~~	~~0.1~~
d_i	0.1	0.1	0.1	0.3	0.6	0.5	0.2	0.2
eq. (2)	A　$\Sigma d_i = \underset{(1)}{0.1} + \underset{(4)}{0.3} + \underset{(2)}{0.1} + \underset{(3)}{0.1} + \underset{(7)}{0.2} = 0.8 \leqq Q_A = 0.8$ B　$\Sigma d_i = \underset{(6)}{0.5} \leqq Q_B = 2.0$							

3．機能評価Ⅱ

地震時に，どの地域が断水するかは多くの要因に左右される。２．で述べた条件を満足することは当然であるが，その他に人為的な影響も大きいと思われる。供給の絶対量が不足した時にはどこを生かすかが問題であり，たとえば火災の発生している所，避難場所，住宅地等を優先して水を送るなどの水配分の戦略とでも言ったものが，実際の地震時の配水調整に大きな影響を与える。また，末端管の被害の大きい所では，その区域全体の供給を停止することも考えられよう。



(a)　(b)

図2　各ケースの断水域（影の部分）

機能評価Ⅰと同様の考え方で，この時の評価を行なう。Ⅰの(2)でf_{si}を求めた後，上に述べた要因による重みづけを行ない，供給しうる（される）節点を式(2)で選んでいく。たとえば，次式で節点iの重要度，その地域の末端管被害の大きさを考慮した供給され易さの指標f'_{si}を与える。

$$f'_{si} = (f_{si} - N_{Di} \cdot q_l) \cdot I_i \qquad (3)$$

ここで，N_{Di}はi区域の末端配水管被害個数，q_lは１つの被害箇所からの平均漏水量，I_iはiの重要度を表わし，I_iが大きいほど重要度が増す。ただし，需要量の大きさ（需要家件数）はf_{si}に含まれていることに注意する。

４．あとがき

ここで述べた評価法は，現時点で開発途上であり，大まかな方法論と理解していただければ幸いである。特に，機能評価法Ⅰは，管網計算を行なうなどしてcheckしなければならないであろう。今後は，実際に水道運用に携わっている方々の意見を仰ぎながら，評価基準を確固たるものにしてゆく所存である。

参考文献 (1) たとえば，AU STELSON，成田誠之助訳，システム工学入門，学献社，１９７０年