

(135) 知識ベースに基づくライフライン網の復旧支援パソコンシステムの開発

建設省九州地建 東川直正

京都大学工学部 家村浩和 山田善一 伊津野和行

1. はじめに

ライフライン網が地震によって被害を受けた際に、その復旧順序を決定することは重要な問題である。復旧順序を決定するシステムとしては、評価関数を用いて科学的に行う方法と、専門家の経験的判断を言葉などで入れておいて作成したエキスパートシステムがある。支配方程式が解析的に確立された問題は、大型計算機を用いれば複雑な計算でも解くことができる。しかし、復旧支援システムは末端の管理担当者を対象としているので、手軽なパソコンなどで作成することが望ましい。ここで問題となるのは、ライフライン計算は複雑で、パソコンレベルでは非常に時間がかかったり解けなかったりすることである。本研究では、これらの問題を解決するため、まず、大型計算機を用いて被害復旧シミュレーションを行い、その結果から回帰式を導いてパソコンで復旧順序を決定するという簡単な計算方法(シミュレーションに基づく知識ベース)を、上水道網を例に検討した。

2. 対象ネットワークシステムと復旧順序の判断指標

利用する上水道網が少しでも現実的なものであるように、仙台市の茂庭地区の上水道網を利用する。ただし、1978年当時のものである。この年の宮城県沖地震で仙台市の上水道網は大きな被害を受けている。配水幹線をモデル化したものを図1に示す。このネットワークの完全な状態(被害を受けていない状態)での各ノードの全水頭と流量を求めた。取水量は平常時で1人1日あたり300ℓとし、ピーク時はその1.5倍と考えた。

それぞれのノードの全水頭と位置水頭を求めると、十分な水頭があることがわかった。ピーク時であっても、何本かのリンクの切断や、局地的な大漏水がない限り水圧不足によって取水できないノードが存在する可能性は少ない。宮城県沖地震時でも、送水量を平常時の1.5倍程度にすることで取水できないノードが発生するのを防ぐことができた。

本研究では、少量の漏水は考えずに、何本かのリンクの切断あるいは大漏水が発生している地震直後の大被害を対象とした。少しぐらい損傷して漏水していても、上流から水を送り続けられれば全ノードにある程度の供給は行える。しかし、リンクの破断や大漏水が発生すれば、そのリンクのバルブを閉めて水を流さないようにする。こうなるとネットワークは、そのリンクを取り除いたネットワークに変化し、水の流れを計算し直す必要がある。

ここでは、まず、リンクを何本か取り除いたとき、どのような評価関数を用いるべきか検討した。本研究では、問題の簡単化のため、水理学上の損失の回復を最大にするように順序を定め

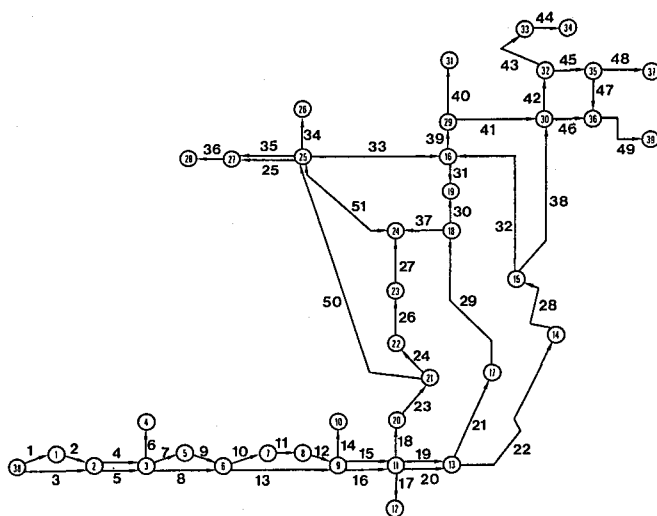


図1 仙台市茂庭地区上水道網ネットワークモデル

ることにした。本研究で用いた用いた評価関数 f を言葉で表わすと、次のようになる。

$$f(i) = \frac{\text{n本のリンクを切断した時のすべてのノードの全水頭の和}}{\text{n本のリンクのうちのi番目のリンクだけが復旧完了した時のすべてのノードの全水頭の和}} - \text{リンクiだけを復旧したときに減少する損失水頭} \dots\dots\dots ①$$

孤立ノードは生じないこととし、水の供給できないノードはないという仮定の下で解析を行っているので、水が行き渡らないということは生じない。よって、全水頭によって、各ノードに水を供給しやすいかどうかを判断することができる。これらのことより、 f が大きいものほど早く復旧すべきリンクと考えても差し支えないと判断した。

3. シミュレーション結果

乱数を発生させて破壊リンクを仮定し、大型計算機を用いて①式の指標 f に基づいた復旧シミュレーションを行った。ただし、孤立ノードは生じないように注意して破壊リンクを定めた。まず、破壊リンクの数を1本に限定してシミュレーションを100回実施し、次に破壊リンクを2本、3本、4本、5本にそれぞれ限定して100回のシミュレーションを行った。その時の、指標 f の値の平均値とばらつきなどを表1に示す。1～4本を切断した場合の f 値の平均値はほぼ同じであるが、5本切断したときの f 値の平均値はそれらより大きい。分散、最大値などを見ると、4～5本の場合は1～3本の場合よりかなり大きい。これは、4～5本破断したときの被害と1～3本破断したときの被害の差が非常に大きいことを表わしている。また、4～5本のリンクの組合せによって、ネットワークが機能上大損失を受ける組合せが何通りか存在することを示唆している。つまり、あるリンクが1本だけ被害をうけてもあまりネットワーク全体に影響を与えないが、そのリンクが他のリンクと同時に被害を受けることによって全体に大きな影響を与える場合があるということである。

表1 シミュレーションによる指標 f の統計量

切断本数	平均	分散	最大値	最小値
1	5.9	6.4	20.2	-2.4
2	4.6	5.8	20.2	-4.0
3	5.6	6.3	25.2	-5.3
4	5.8	7.2	38.5	-11.6
5	6.8	8.6	68.7	-10.1

4. 各水道管の特性を考えた回帰分析

大型計算機でシミュレーションを行った結果を、どういった因子が復旧順序において重視されているかを求めるために、回帰分析を行った。まず、評価関数 f に影響を与えるであろうと考えられる因子を用いて次のように定式化を行った。

$$f(i) = a_1 x_1(i) + a_2 x_2(i) + \dots + a_6 x_6 \dots\dots\dots ②$$

- ここで、 $x_1(i)$: リンク i の直径 [m]
- $x_2(i)$: リンク i の下流側の人口 [人]
- $x_3(i)$: 水源からの最短距離 [m]
- $x_4(i)$: リンク i が連結しているノードの他の接続リンク数 [本]
- $x_5(i)$: リンク i の長さ [m]
- $x_6(i)$: リンク i の迂回路の長さ [m]
- $a_1 \sim a_6$: 係数

f と $a_1 \sim a_6$ はまったく次元の違うものであるが、これらを用いて直線回帰することにした。京都大学大型計算機センターのアプリケーションパッケージ SAS を利用して回帰分析を行い、②式の係数 $a_1 \sim a_6$ を決定した。解析例を図2に示す。これらの計算の結果、次のようなことがわかった。

- (1) 長いリンクの方が重要である。
- (2) 太いリンクの方が重要である。
- (3) 水は代替路によって迂回すると損失が大きくなる。
- (4) そのリンクが接続しているノードに他のリンクの接続が少ないほど重要である。

- (5) リンク全体に対して切断される本数の割合が少ないと、水源に近いリンクが重要である。しかし、破壊リンク数のリンク全体に占める割合が大きくなると、水源からの距離は損失にあまり関係しない。

なお、リンク22とリンク28の2本のリンクは、理由は不明であるがネットワークの中で特別な意味を持っていてと推測され、この2本のリンクが破断したと仮定した場合に限って、有意な答を導くことが不可能であった。リンク22と28の復旧は別途考慮することとした。

リンク破断が2本から4本の時、因子 $x_1 \sim x_6$ までの組合せに対する回帰分析を行った結果、最も回帰が良好なのは、 x_1 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 の5つを因子とした場合であった。図2の例は4本のリンクが破断した場合のこの組合せである。リンクの破断が5本の時は、上記(5)にも記したように因子 x_6 の t 値が非常に小さなものであったので、回帰式から x_6 を除いて考えた。

5. パソコンを用いた復旧支援システム

ライフラインが地震被害を受けると、どこを優先して復旧するべきかを決定するのは非常に困難なことである。しかも、最前線で働く管理担当者は、速やかに適切な判断を行い、復旧にあたらねばならない。そこで判断を支援するシステムが考えられるが、これまでの研究では大型計算機を用いたものが多い。しかし、大型計算機はどこにでもあるというものではないので、パソコンレベルで復旧支援システムを構築することは有用だと考えられる。

そこで、②式の回帰式を利用して、パソコンによる支援システムを構築した。しかし、孤立ノードを取り扱えないことと、リンク22とリンク28を含めた回帰分析がうまくできなかったことを考慮して、本システムでは次の順に復旧を優先させることとした。

- (1) 孤立ノードが生じるような破断は第一に解消することとし、そのようなリンクの復旧を最優先する。ただし、孤立ノードが何箇所かで発生した場合、できるだけ多くの人に水が行き渡ることを考え、水の行き渡らない人口の多い被害の解消を優先する。
- (2) 孤立ノードが生じないときは、リンク22、リンク28を優先する。シミュレーションによると、これらのリンクを復旧することによって、常に損失はかなり大きく回復されていたので、それほど非合理的な判断とはならない。また、リンク22と28が同時に切れた場合には、リンク22を優先する。これは、いずれの場合もリンク22の復旧による損失の減少効果の方が大きかったことによる。

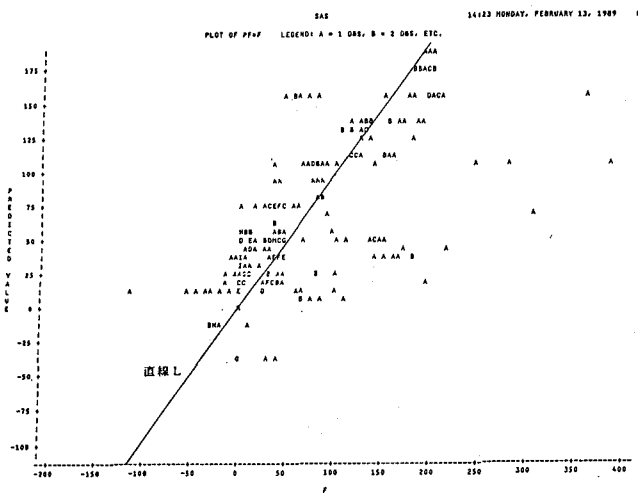


図2 種々の因子による回帰分析の結果(例)

(3) 上記(1)(2)以外の場合は、②式の回帰式によって復旧優先順位を決める。

以上のことを図3にフローチャートで示す。大型計算機によるシミュレーション結果を知識ベースとして利用するシステムとなっている。

次に、本システムを利用して復旧順序を求めた場合と、大型計算機で①式の指標 f に従って復旧順序を求めた場合とを比較検討した。一例を図4に示す。この例ではリンク3、15、21、41が破断している。大型計算機で求めた水理学上の損失の回復に最適な復旧順序はリンク3→15→21→41であり、本システムの出した答もこれに一致した。リンクの破壊を乱数によって決め、約100回のシミュレーションを行った結果、判断が一致したのは約7割強であった。6つの因子からなる簡単な回帰式を用いたことを考慮すると、良好な結果ではないかと考えられる。

6. 今後の課題

本システムの問題点及び課題は以下の通りである。

- (1) リンク22とリンク28の破壊をうまく取り扱えない。汎用的なシステムとするためには、これらのリンクの特性を見つける必要がある。
- (2) 評価関数として、水文学的な損失の回復程度を考えたが、現場の管理担当者にとって最適な評価関数であるかどうかは疑問である。緊急時の復旧作業という特殊性をもっと考慮すべきかもしれない。
- (3) 回帰分析にあたって、より適切な因子があるかもしれない。それを考慮すれば大型計算機との判断の一致率が上がる可能性がある。
- (4) システムの利用者が使用方法を間違ったときの対策も考慮すべきである。実用化を目指すのであれば、より細かい対話処理が望ましい。
- (5) パソコンの能力も最近向上してきているので、パソコンによる計算・判断部分を増やし、より高機能なシステムとすることも可能であろう。

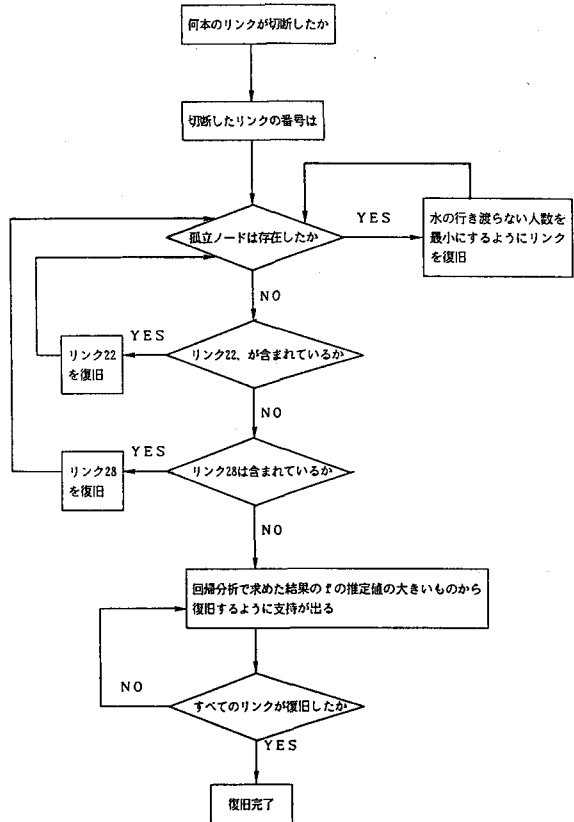


図3 パソコンによる復旧支援システムのフローチャート

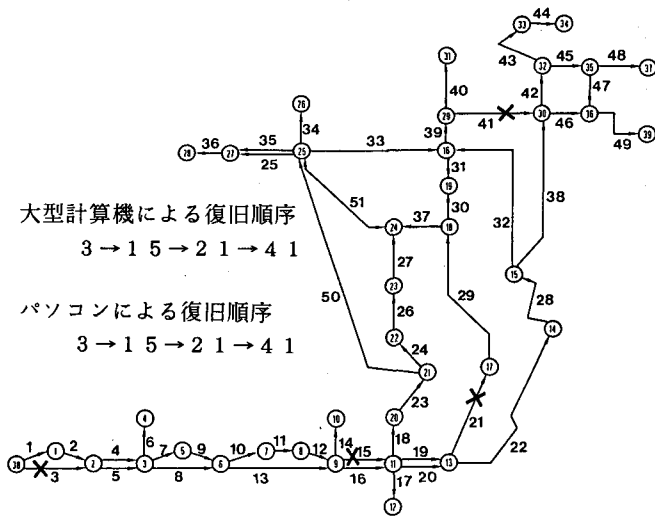


図4 上水道網の被害例 (×印でリンクが破断)