

I-200

ライフライン網の機能満足度に対応する最適復旧支援システム

住友金属工業(株) 正員 竹内大輔 京都大学工学部 正員 山田善一
 京都大学工学部 正員 家村浩和 日本電信電話(株) 正員 佐藤隆明

1. はじめに 本研究は、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ための対話型システムを作成し、目標とする機能復旧レベルを変化させることにより、復旧の手順がどのように変化するかを考察した。水道網の復旧作業には、水が供給されなかったり、されにくい地区について、人々が生活していく上で最低限必要とするサービス水準まで復旧させる緊急的な復旧作業や、人々がサービスを安定して受けることが出来るまで復旧させる安定供給を目指した復旧作業、ネットワーク全体を完全な状態まで復旧させる完全復旧作業などがある。今回はこの3点について考えることにし、パソコンレベルで復旧支援のプログラムを開発して復旧順序を求めた。さらに、ネットワークの形状についての考察も行なった。

2. シミュレーション計算 図1のような上水道ネットワークを用いた管路網解析にはエネルギー位法を採用し、クラウト法を用いて管路網計算における連立一次方程式の演算の高速化を可能にした。モデル化において、5本のリンクを切断し、そのリンクより水が漏水したと仮定した。

3. 復旧支援の考え方と結果 まず使用する語句の説明をする。

○機能率 リンクを切断すると、完全な状態の時よりもエネルギー水頭は下がる。各ノードについて完全な状態の時のエネルギー水頭を基準として、リンクが切断されている時のエネルギー水頭を比率として表したものを各ノードにおける機能率とする。

機能率 = (その時点におけるエネルギー水頭) / (基準のエネルギー水頭)

○機能満足度 復旧過程において、あるノードの機能率がN%を越えたとき、そのノードについての応急的復旧は完了した、ということにする。そして、すべてのノードの機能率がN%を越えたとき、ネットワークについての応急的復旧は完了した、ということにする。ここにてでくるN%という値を機能満足度と名付けた。

○評価関数 復旧過程における機能評価の尺度となる復旧度の評価関数Fは

$$F = \frac{\sum (\text{ノード } i \text{ におけるその時点におけるエネルギー水頭})}{\sum (\text{ノード } i \text{ における基準のエネルギー水頭})}$$

(ノードiとは機能満足度に達していないノードである。)

○要素閉管路 巡回路のうちそれ自体に他の巡回路を含まないもののことである。図1にそれを示した。

○重要ノード ネットワークを構造的見地から見た場合、明らかに重要であろうと思われるノードのことである。

○最大損傷ノード 機能満足度を満たしていないノードのうちで機能率が最も低いノードのことであると定義する。

本研究では、8通りのモデルを考えた。その1つで5本のリンクが破壊したモデルが図2である。このモデルについて機能満足度の概念を適用すると表1のような結果となった。また、新しい復旧順序の考え方が生まれた。実際のネットワークの復旧順序を決定するに当たって、最低でも満足しなければならない機能率というものを設定し、それをA%、安定供給を確保できるだけの機能率をB%、完全復旧をC%(100%)とすると、まず機能満足度をA%として復旧順序を求め、復旧が完了すれば、機能満足度をB%として復旧順序を求める。そして、その復旧が完了すれば機能満足度をC%(100%)として復旧順序を求め、完全復旧が完了する。

A = 20, B = 60, C = 100の時、図2のモデルにおける復旧順序はリンク24, 32, 42, 50, 19の順となった。

4. ネットワーク形状に関する考察

それぞれのネットワーク形状について考察した結果、重要ノードの連結性を高め、また、最大損傷ノードを含む要素閉管路を作るリンクを復旧することが、機能満足度が低い場合、第一にすべき復旧作業である。また、要素閉管路1は全体の機能率を向上させ、要素閉管路6、7は下流部ネットワークの機能率を向上させ、要素閉管路2、3はランクA、Bの重要ノードの連結性を高め、また、最大損傷ノードを含む要素閉管路であるので、早急に復旧すべきであり、要素閉管路4、5は配水管の性質上あまり重要とは思われない、ということがわかった。

ネットワーク形状が復旧に及ぼす影響を定量的に表わすため、構造重要度という概念を導入した。これは、Fault Tree Analysis で用いられるものであり、頂上事象と呼ばれるシステムのある特定の破壊と、基本事象と呼ばれる互いに独立と考えられる構成要素の破壊との関連をブール理論によって樹系図として表現したものである。従って、システムの破壊がどのような原因（あるいはその組合せ）によるかを示したものである。今回は、モンテカルロ・シミュレーションを用いて構造重要度の算定を行なった。この場合はリンクの特性値として扱うという意図から、

(1)供給点と各需要点との非連結 (2)各点相互の非連結の2通りの頂上事象について考えた。この2つを比較してみると、(1)はややネットワーク全体の形状を表わす指標なのに対し、(2)は部分的な形状を表わす指標であると考えられる。これらの重要度とリンクの長さ、管径、水源からそのリンクまでの最短距離、平常時流量を因子として、復旧順序に関する回帰分析を行なった。その結果はほぼ同程度の相関を示し、(1)と(2)の相互の決定的な違いを定めることはできなかった。また、構造重要度が特に卓越する因子であるとは言えない。これは、ネットワークが完全な状態で求められた構造重要度を変動的な要素を扱うために利用するには限界があること、また根本的にネットワークの破壊確率について扱うものなので、部分的な復旧に対する導入には無理がある、などの原因が考えられる。

表1 機能満足度別の復旧順序

機能満足度 (%)	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4	STEP5
100	32	42	24	50	19
90	32	42	24	50	19
80	32	24	42	50	復旧完了
70	32	24	42	50	復旧完了
60	32	24	42	復旧完了	
50	32	24	42	復旧完了	
40	32	24	19-42-50	復旧完了	
30	50	24	19-42-32	復旧完了	
20	24	32-50	復旧完了		
10	24	32-50	復旧完了		

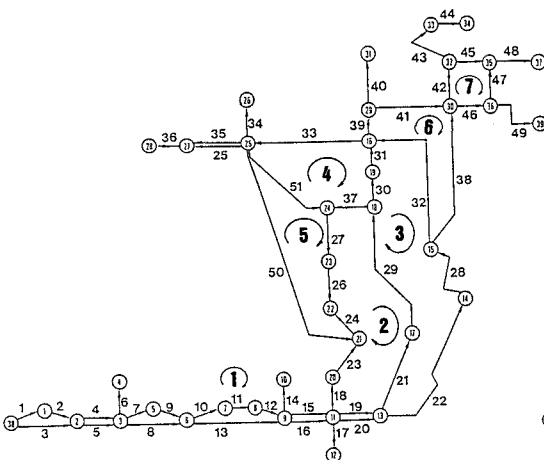


図1 上水道管路網のモデル

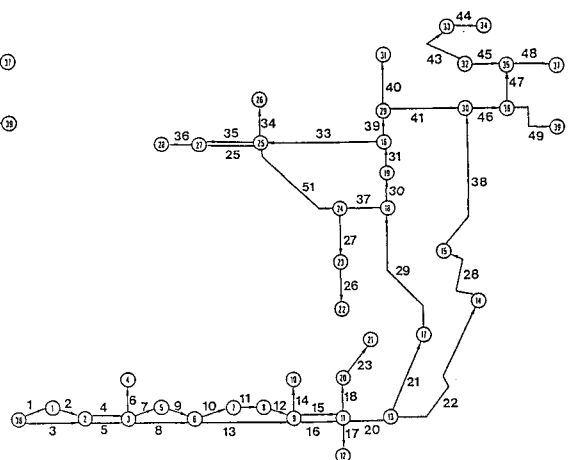


図2 破壊したネットワークモデル