

地震時におけるライフラインのシステム信頼度のための ネットワーク解析

京都大学工学部 正員 亀田 弘行
大阪瓦斯(株) 正員 尾崎洋一郎

1. まえがき

近年の都市機能の高度化に伴いライフラインシステムの耐震性の検討が耐震工学上の重要な課題となっている。特に水道およびガス供給施設の破壊は、地震時の二次災害の原因となるため、より高い耐震性が要求される。これらのシステムは、複雑な管路網からなりその大部分は地中に埋設されている。地震時における地下埋設管の挙動は、主に地盤の運動速度あるいはびずみに依存することは知られているが、現在のところ詳細な挙動を十分に予測できるまでには至っていない。また複雑なネットワークを構成しているためにシステム内の一部分の損傷が全体の機能性に与える影響は、容易には推定しえない。本研究はこれらの問題点を考慮して、地震時におけるライフラインのシステム信頼度を求めるためのネットワーク解析の基礎的手法を検討したものである。

2. 解析モデル

解析モデルとしては、4つの地盤モデル(I~IV)に埋設された管路網を用いた。(図-1)管路網は、ノードとアークによって表現され、各アークは地震時における信頼度によって重みを付加される。またノードは、重要施設および構造形式が変わる地点に対応する。このネットワークモデル内の任意の2つのノードが、少なくとも1本のパス(アークの連なったもの)によって結ばれている確率(terminal reliability)をシステム信頼度のひとつの指標として用いる。

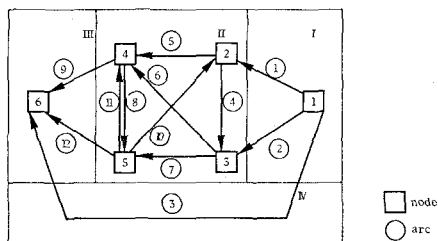


図-1 モデルネットワーク

ネットワーク内の任意の2つのノードを結ぶパスは無数にあるが、この中で、どのノードをもたかだか1回しか通らないパス(simple path)を捜し出す。これはノードを結びつけるアークの存在ないしその方向性を与える隣接行列より求められる。これらの simple path は、一般にはいくつかのアークを共有するために、アークの信頼度をそれぞれ乗じてその和を求めても、terminal reliability とはならない。地震時におけるアークの非破壊または破壊という事象をブール代数の真および偽に対応させることで、simple path 群から、互いに素な形式に導くことが比較的容易に行なわれる。このようにして terminal reliability が得られると各アークの信頼度を個別に変動させ、その時の terminal reliability の値によって、そのアークの損傷がネットワーク全体の機能性、信頼性に与える影響を推定することが可能である。(図-2) なお、この手法においてはアークの信頼度は

3. 解析および計算結果

ネットワークの terminal reliability を求める有効な方法のひとつとしてブール代数を用いた手法がある。¹⁾ ネットワーク内の任意の2つのノードを結ぶパスは無数にあるが、この中で、どのノードをもたかだか1回しか通らないパス(simple path)を捜し出す。これはノードを結びつけるアークの存在ないしその方向性を与える隣接行列より求められる。これらの simple path は、一般にはいくつかのアークを共有するために、アークの信頼度をそれぞれ乗じてその和を求めても、terminal reliability とはならない。地震時におけるアークの非破壊または破壊という事象をブール代数の真および偽に対応させることで、simple path 群から、互いに素な形式に導くことが比較的容易に行なわれる。このようにして terminal reliability が得られると各アークの信頼度を個別に変動させ、その時の terminal reliability の値によって、そのアークの損傷がネットワーク全体の機能性、信頼性に与える影響を推定することが可能である。(図-2) なお、この手法においてはアークの信頼度は

Kameda Hiroyuki,

Ozaki Yoichiro

互いに独立であるとして terminal reliability を求めている。本研究では先の4つの地盤モデルに対して、地震時の地盤ひずみの平均値を想定し、それに対応したアークの信頼度を与えている。さて、この手法を用いても、実際の複雑な管路網を対象とする場合には、ノード数、アーク数が多くなり数値計算上、演算時間および計算容量が問題となる。特に terminal reliability の互いに素な形式を求める際に、同一の項が増加し、非常に大きな容量がそのために必要となる。予めこれに制限を与えておくことで、ひとつの近似解を得ることが出来る。(図-3) 比較的収束が速いので、計算を幾度か繰り返すことによって精度よい近似解を簡単に得ることが出来る。また確率ネットワーク内の任意の2つのノード間の terminal reliability を近似的に求める方法として、その上限値を用いる方法がある。²⁾

$$T_R \leq 1 - \prod_{i=1}^m \left\{ 1 - \prod_{k \in i} P(A_k) \right\}$$

上式の上限值において m は simple path の数を、 $P(A_k)$ は各アークの信頼度を表わす。したがって m を小さくすれば、上式右辺は T_R に近づく。

すなわち、 T_R の上限値をとることで、ネットワーク内の2つのノードの連結性に対応する全事象を縮小することとを互いに相殺させることで、 T_R の近似値を求めようとするものである。simple path 群の数を減らす際には、simple path 相互の相関度を用いる。互いに相関度の高い2つの simple path がある場合、一方を他方によって表わし得るものとして取り除く。この時の相関係数は、各アークの特徴値によって定まるものとし、本研究では各ゾーンに与えられた地盤のひずみを特徴値として採用した。また、パス相互の相関係数の境界値を定めなければならないが、これについては次式のパラメータ ρ^* を提案した。式中 ρ_{ij} は、 i 番目と j 番目の simple path の相関係数である。計算結果の一例を図-4に示す。

$$\rho^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \rho_{ij}}{m(m-1)}}$$

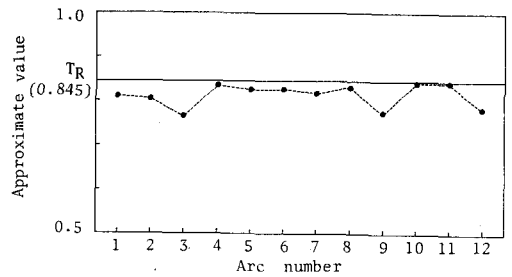


図-2 各アークのシステム信頼度に対する影響
(各アークの信頼度の変動幅: -0.30)

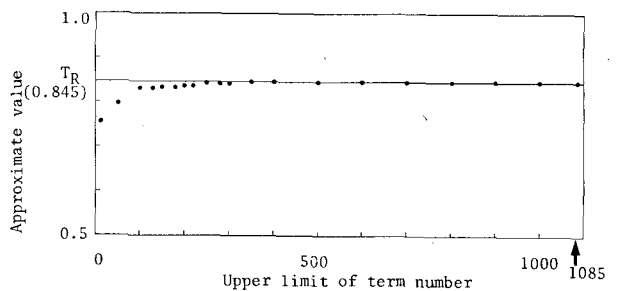


図-3 近似解 1

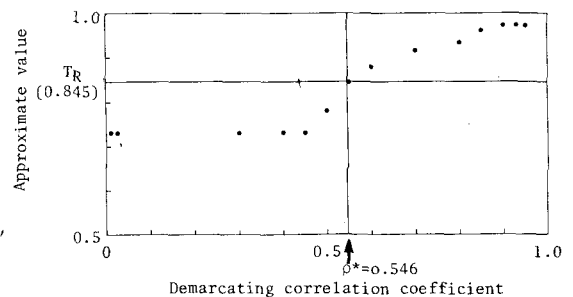


図-4 近似解 2

1) Fratta and Montanari, "A Boolean Algebra Method for Computing the Terminal Reliability in a Communication Network," IEEE Trans. Circuit Theory, vol. CT-20, No. 3, May 1973. 2) Ang and Chaker, "Analysis of Activity Networks under Uncertainty," Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, EM4, Aug. 1975.