

PSI-23 大規模ライフライン網の地震時信頼性の向上戦略

京都大学防災研究所 正員 佐藤忠信

日本道路公団 正員 関谷富彦

1. ネットワークの地震時信頼性解析法

ネットワークを節点であるノードとそれを結ぶリンクにモデル化する。ノードならびにリンクの破壊レベルを支配する変量を Y とすれば、 Y は断層からの最短距離 r 、地震のマグニチュード M 、地盤や要素の特性を支配するパラメータ C_k の関数として、次式のような距離減衰則で与えることが可能である。

$$Y=F(r, M, C_k) \quad (k=1, 2, \dots) \quad (1)$$

逆に、要素の破壊の許容レベルとして Y^* を与えれば、式(1)から要素が破壊に到る臨界の距離 r^* が得られる。

$$r^*=F^{-1}(Y^*, M, C_k) \quad (k=1, 2, \dots) \quad (2)$$

この距離を限界震源域距離、これを半径とする球をその要素の影響圏と定義する。この影響圏の概念を用いて、ネットワーク全体の損傷状態数が構成要素の2乗に比例するアルゴリズム¹⁾が開発されている。この解析法では、2次元的な拡がりを持つ潜在的断層発生域を想定し、地震断層は潜在的断層発生域内において一様に発生するとしている。断層と影響圏が交われば、その構成要素は破壊した状態になる。各構成要素の影響圏により、潜在的断層発生域がいくつかの領域に分割され、それぞれの領域ごとに異なるネットワークの損傷状態を表すことになる。

潜在的断層発生域が影響圏によって N 個の領域に区分されているとし、 i 番目の領域の面積を A_i 、信頼性指標を I_i とする。信頼性 $R(G|M)$ はネットワークが安全である領域の面積の総和を潜在的断層発生域の面積で除することによって表現できる。すなわち信頼性 $R(G|M)$ は次式のように表現できる。

$$R(G|M) = \left\{ \sum_{i=1}^N I_i \cdot A_i \right\} / \sum_{i=1}^N A_i \quad (3)$$

いま、図-1(a)に示すような3本のリンクからなるネットワークABCを考える。このネットワークの構成要素の影響圏と潜在的断層発生域との交わりが、図-1(b)のようになっているものとする。ネットワークの信頼性基準をAからCへ接続できることとすれば、図-1(b)の領域②③④に地震断層が発生すると、信頼性は満たされなくなるので、式(3)からこのネットワークの信頼性は、(潜在的断層発生域の面積-(②+③+④)の面積)/潜在的断層発生域の面積、で計算されることになる。

2. 地震時信頼性の向上アルゴリズム

図-1の例でリンクACの強度を向上させると、ネットワークの信頼性がどの程度向上するかを考える。リンクACの強度向上の程度によって、影響圏と潜在的断層発生域との交わりを示す図は、図-1(c), (d)の2つの場合に分けられる。図-1(c)はリンクACの強度向上が小さい場合を示している。この場合、潜在的断層発生域上に現れる各領域の形状は大きな変化を受けることがないので、図形の相似の性質を利用して近似的に信頼性の変化量を計算することができる²⁾。これを近似的重要度評価法と呼ぶ。一方、強度の向上が大きい場合には図-1(d)に示すように、領域の形状が大きく異なってくる可能性がある。従って、この場合には潜在的断層発生域上に現れる領域の計算をすべてやり直す必要が生じる。ここで用いる解析法で一番時間の要するのは、領域作成とその面積計算であるから、これを短縮するために以下のようなアルゴリズムを開発した。すなわち、図-1(b)の領域構成図からリンクACの交面を取り除き、図-1(e)のような領域図を作成し、そこに新しいリンクACの交面を挿入し、図-1(d)を作成することにより信頼性の変化量を厳密に求める手法である。これをはぎ取り挿入法と呼ぶ。

3. 近似的重要度評価法による構成要素の順序づけ

近似的重要度評価法を用いて、図-2の中庄A管からなる湘南地区ガス管網に対し、構成要素の順序づけを行った。ガス導管耐震設計指針に基づいて、マグニチュード6.6の影響圏を計算し、潜在的断層発生域とし

て関東地震を想定した。この場合、3個の構成要素しか順序づけができなかったが、原因は次の通りである。ここで対象としたネットワークは、図-2に示すように冗長性の少ない構造をしている。信頼性基準を4個の供給ノードから末端の147個全てに到達できることとした場合、1個あるいは2個の要素が破壊することによって、ネットワークが信頼性基準を満たすことができなくなる。さらに、湘南地区ガス管網の影響域は、図-3のような同心円状となり、一番外側の構成要素の影響域の内側で構成される領域は、すべて信頼性基準を満たさない領域となる。これらの原因により、近似的重要度評価法のアルゴリズムは、指標関数の異なる領域を検索する所で、3個の構成要素しか選ぶことができなかった。

4. 構成要素の強度向上による信頼性の変化

構成要素に対して近似的重要度評価法による順序づけに従い、補強・強度向上を実行すれば、信頼性は効率よく向上していく。しかし近似的重要度評価法を用いて決定された重要構成要素を改善した後、次にどの構成要素を改善すべきかという情報や、一度に数十個の構成要素を改善するような場合には、重要構成要素以外にどの構成要素を改善すべきかという情報は、1回の近似的重要度評価法では得ることができない。そこで、1回の近似的重要度評価法によって得られた重要構成要素を改善し、はぎ取り挿入法によりネットワークの信頼性の変化量を計算するという過程を1ステップとし、各ステップ毎に重要構成要素が検索でき、信頼性がどのように向上していくかを確認できるアルゴリズムを開発した。この解析法により、湘南地区ガス管網にマグニチュード6.60で、構成要素の改善の割合を40%にして信頼性向上を行った結果が図-4である。

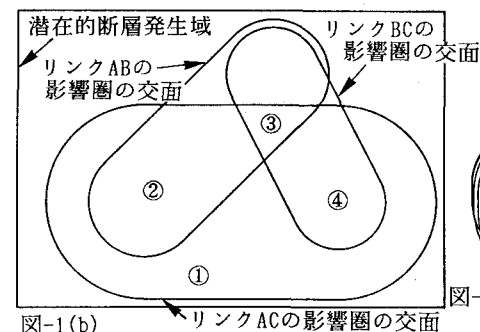
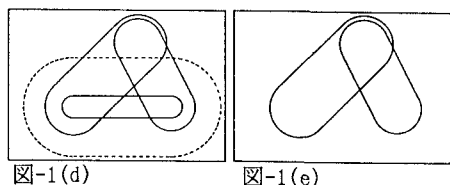
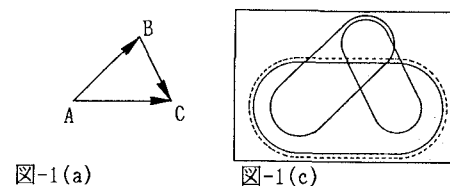


図-1 潜在的断層発生域と影響圏の交面

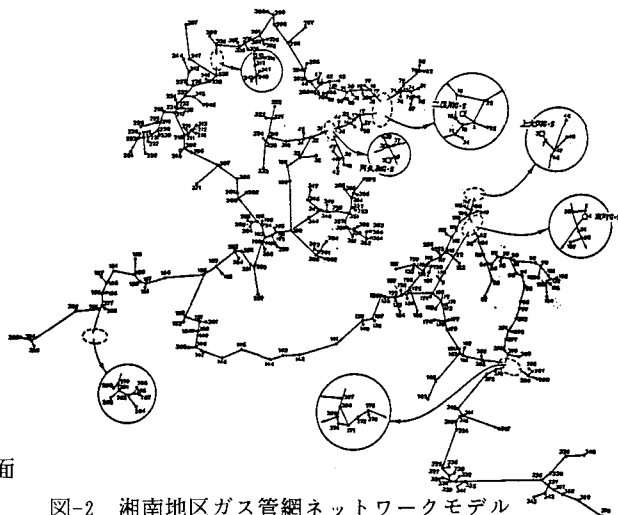


図-2 湘南地区ガス管網ネットワークモデル

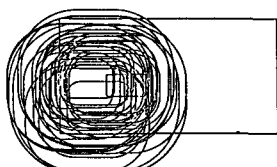


図-3 湘南地区ガス管網の影響域

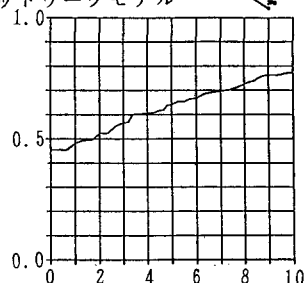


図-4 信頼性の向上過程

参考文献

- 1) Sato T: Natural Disaster Science, Vol.6, No.2, pp.51-72, 1982
- 2) Sato T: Lecture Notes in Engineering, Vol.32, Stochastic Approaches in Earthquake Engineering, Springer-Verlag, pp.231-251, 1987