

京都大学工学研究科 学生員 ○大道 裕紀
 京都大学防災研究所 正会員 佐藤 忠信
 大阪ガス(株) 正会員 小川 安雄

1. はじめに

大規模ライフラインシステムの地震時信頼性解析は、事象空間法を用いた場合、ネットワークの構成要素の増加に伴い考慮すべき状態数が指数関数的に増加するため、解析が困難である。この問題を克服する手法として、影響圏の概念を用いた解析手法¹⁾がある。本研究では、この概念に基づいた、断層系の活動を考慮した地震時信頼性解析手法を提案し、実在のガス導管ネットワークに適用してその有用性を検証する。

2. 影響圏と潜在的断層発生域

ライフラインはノードとリンクにモデル化される。ノードおよびリンクを構成する要素の破壊レベルを支配する変量を Y とし、 Y が地震マグニチュード M 、断層からの最短距離 r 、地盤や要素の特性を表すパラメタ C_k の関数 $Y = F(M, r, C_k)$ で表されるとする。いま、要素の破壊条件として $Y \geq Y^*$ が与えられたとき、破壊・非破壊の臨界の距離 $r^* = F^{-1}(M, Y^*, C_k)$ を逆算することができる。この r^* を影響距離、 r^* を半径とする球を影響圏と定義する。ノードの影響圏は球となる。リンクの影響圏は、端点から端点へと影響距離が線形に変化する無数の点から成るものを考え、両端の影響距離を用いて図-1のように理想化を行う。影響圏の内部で地震断層が発生すれば、構成要素は破壊する。

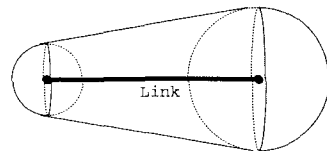


図-1 リンクの影響圏

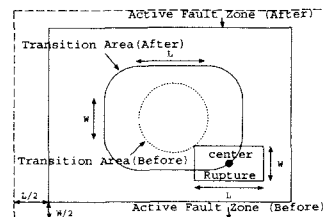


図-2 影響域と潜在的断層発生域

本手法では、地震発生機構の不確定性を考慮する。すなわち、ある長方形領域(以下、潜在的断層発生域)を想定し、この領域内で地震断層がある確率をもって発生すると考える。また、以下の解析のため、断層パラメタのスケールリング則²⁾等を用いて、地震断層の大きさをモーメントマグニチュードの関数として表す。

ここで、影響圏と潜在的断層発生域との交面(以下、影響域)を考える。地震断層と影響域が交わる領域内では構成要素は破壊した状態になる。こうした領域を定量的に評価するために、地震断層の発生位置をその中心で表現できる座標系を利用する。いま、ノードの影響圏が潜在的断層発生域と交わったときを考える(図-2)。この場合、影響域は円(点線)となる。この円と地震断層が交わる時、その中心は実線で示される領域内にある。以後、これを影響域と考える。また、潜在的断層発生域(破線)に関しては地震断層の中心が存在し得る領域を考え、以後、これを潜在的断層発生域(実線)と考える。

3. ネットワークの信頼性計算

信頼性には様々な定義がある。ここでは、ある需要点から全ての需要点に到達できる確率をネットワークの信頼性と定義する。以下では簡単のため、地震断層の発生は潜在的断層発生域内において一様であるとする。

いま、潜在的断層発生域が、ネットワークの各構成要素の影響域により多数の領域に分割されている状態を考える。この状態は、ネットワークの損傷状態を表す一種のベン図となる。すなわち、各領域に地震断層の中心がある場合のネットワークの損傷状態を

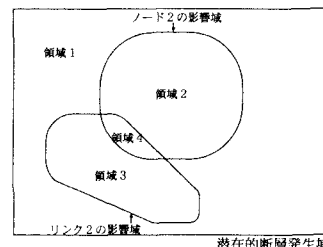
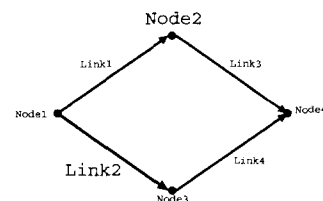


図-3 影響域による潜在的断層発生域の分割例

考えることにより、損傷状態の組合せ全てを考慮することができる。したがって、信頼性はネットワークが安全である領域の面積の和を、潜在的断層発生域の面積で除することにより得られる。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (I_i \cdot S_i)}{\sum_{i=1}^N S_i} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 N は総領域数、 S_i は領域 i の面積、 I_i は領域 i に地震断層の中心がある場合の指標 (ネットワークが機能する場合 1、しない場合 0) である。例えば図-3 上のような簡単なネットワークを考える。供給点はノード 1、需要点はノード 4 とする。また、影響域により潜在的断層発生域が図-3 下のように 4 つの領域に分割されているとする。ただし、ノード 2 とリンク 2 以外の影響域は潜在的断層発生域上には現れていないとする。このとき、地震断層の中心が領域 4 にある場合、ノード 2 とリンク 2 が破壊し、ネットワークが機能しなくなる。その他にある場合は、ネットワークは機能する。すなわち、この場合の信頼性は領域 4 の面積を潜在的断層発生域の面積で除することにより得られる。

最後にネットワークの損傷状態数について述べる。 n 個の円があるところに 1 個の円を付け加えると、新しい交点が最大 $2n$ 個でき、領域も最大 $2n$ 個増えるので、 n 個の円よりできる領域数の上限値は、等差 2 の等差級数となる。この性質は、ノードの影響域のような図形の場合でも変わらない。同様に、リンクの影響域のような図形の場合、領域数の上限値は等差 4 の等差級数となる。結局、構成要素数 n のネットワークを考えた場合、状態数はたかだか $2n^2 - 2n + 2$ となる。したがって、構成要素の数が増加しても事象空間法のように指数関数的には増加しない。

4. 適用例

(1) 対象ネットワークと想定地震

ここでは、大阪市の中圧 A ガス導管ネットワークを解析対象とした。図-4 は、このネットワークのモデルであり、355 個のノードと 366 個のリンクからなる。供給点 (黒三角) は 4 個、需要点 (黒丸) は 43 個である。想定した地震は、上町断層系によるものであり、図-4 のように 3 つの潜在的断層発生域を想定した。影響距離は管の地震時ひずみに着目して算出した。地盤条件は約 250 地点のボーリングデータから推定した。

(2) 断層系の活動による地震を考慮する場合

本解析では、図-4 のように 3 つの潜在的断層発生域を考慮する必要がある。いま、複数の潜在的断層発生域を結合したものを全潜在的断層発生域と呼ぶ。また、発生する地震断層は、全潜在的断層発生域上で長方形になるものとする。このように考えれば、潜在的断層発生域が 1 つの場合と同様に信頼性を求めることができる。

(3) 解析結果

図-5 に、許容ひずみをそれぞれ 3、4、5% とした場合のネットワークの信頼性を示す。いずれの場合もモーメントマグニチュード 6.5 前後で信頼性が低くなるのが分かる。

5. まとめ

本研究では、影響圏の概念に基づいた、断層系の活動による地震を考慮したライフラインシステムの地震時信頼性解析手法を提案した。また、本手法を実在のネットワークに適用することにより、その有用性を示した。

参考文献

1) 佐藤忠信, 末富岩雄 : Seismic Reliability Analysis of Large Scale Lifeline Networks, 第 7 回日本地震工学シンポジウム, pp117-121,1986.
2) 入倉孝次郎, 三宅弘恵 : シナリオ地震の強振動予測, Journal of Geography,110(6),pp849-875,2001

図-5 ネットワークの信頼性

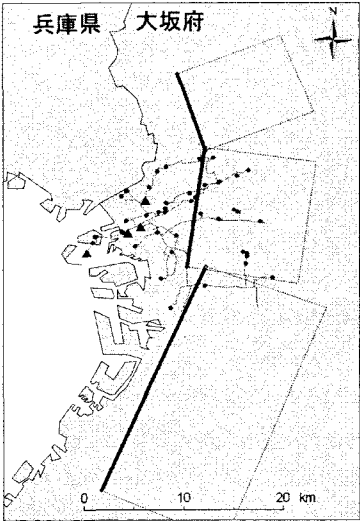


図-4 ネットワークモデルと上町断層系

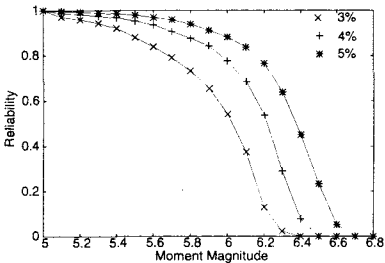


図-5 ネットワークの信頼性