

(86) 構成要素の破壊確率特性を考慮した大規模ライフラインシステムの地震時信頼性解析

京都大学防災研究所 佐藤忠信  
 京都大学防災研究所 土岐憲三  
 大阪ガス(株) 清水謙司

1. まえがき

ライフラインシステムは多数の要素によりネットワークを構成し、広範な地域に構成要素が二次元的に分布している。このためシステムの数個の構成要素の破壊、損傷等の機能不良により、システム全体あるいはその一部分が所定の機能を発揮しなくなりうる。従って、ライフラインシステムの地震時信頼性を評価する場合、構成要素それぞれの耐震性を評価するだけでは不十分であり、ネットワーク全体としての地震安全性も評価しておく必要がある。しかし、大規模なライフラインシステムの信頼性解析は困難であり、システムの信頼性の厳密解を求めることができるのは要素数の少ない簡単なネットワークに限られる。

こうした問題を克服するライフライン地震時信頼性解析手法として、ネットワークの構成要素に対しては影響圏を、地震断層の規模や発生場所の不確定性に対しては潜在的断層発生域を定義することにより対処する手法<sup>1)</sup>がある。この手法では、不確定性は地震断層の規模や発生場所にしか考慮されておらず、構成要素の強度や作用する外力については確定的な取扱いをしている。しかし、構成要素の強度や作用する外力などは多くの要因によって決定することから、不確定性を完全に排除することはできない。

そこで本研究では、影響圏という概念を用いて大規模ライフラインシステムの地震時信頼性を解析する手法に、これまで考慮されていなかった不確定な要因を考慮し、従来より確度の高い信頼性解析を行うとともに、Minimal Cutset 等のグラフ理論に基づく種々の手法を用いることによって効率の良い信頼性解析を行うことを可能とする信頼性解析手法を開発した。

2. 構成要素の破壊確率特性

解析の対象としているライフラインシステムを地中埋設ガス導管網に限定するので、構成要素の破壊を支配する変量として地震時に生じるひずみのみを考える。地震時に構成要素に生じるひずみ $\epsilon$ は、地震の規模  $M$  と地震断層からの距離  $r$  および地盤特性  $C_k$  などから

$$\epsilon = F(M, r, C_k) \tag{1}$$

と表現できる。この地震時ひずみ $\epsilon$ は構成要素への荷重の効果を表す量と考えられ、構成要素の強度を表現すると考えられる破壊基準ひずみ $\epsilon^*$ より大きくなると、その構成要素は破壊すると考えられる。地震時ひずみ $\epsilon$ は様々な不確定性を考慮すると、確定値ではなく、その推定値のまわりでばらつきを持つ。このばらつきを考慮した場合の構成要素の破壊確率特性を定義する手法を図1,2を用いて説明する。地震時に構成要素に生じるひずみ $\epsilon$ を、ガス導管耐震設計指針と最大加速度の距離減衰式を用いて表すと、その推定値は図1中の\*\*曲線で示されるような距離減衰特性を有し、地震時ひずみ $\epsilon$ はそのまわりでばらつく。構成要素は地震時ひずみ $\epsilon$ が破壊基準ひずみ $\epsilon^*$ を上回るとき破壊することになるので、構成要素から距離 $r_1$ の地点にマグニチュード  $M$  の地震が発生したとき、その構成要素の破壊確率  $p_f(M, r_1)$  は、

$$p_f(M, r_1) = P(\epsilon_{r_1} \geq \epsilon^*) \tag{2}$$

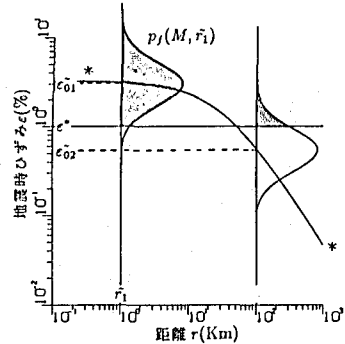


図-1 地震断層からの距離の違いによる構成要素の破壊確率  $p_f(M, \bar{r})$  の変化

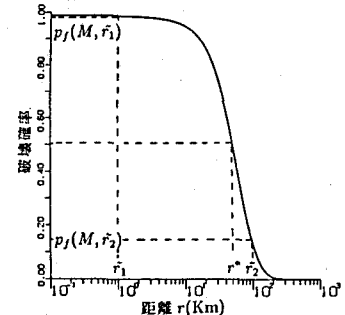


図-2 ばらつきを考慮した場合の地震断層からの距離と破壊確率の関係

となり、図1の斜線で示す部分の面積に相当する。そして構成要素と地震断層の距離を変化させると、図2のように地震断層からの距離と構成要素の破壊確率の関係を定義することができる。

### 3. システムの地震時信頼性解析手法

地震発生機構の不確定性を考慮するために、本研究では地震断層の発生すると考えられる二次元的な拡がりを潜在的断層発生域と定義し、この潜在的断層発生域の内部で地震断層が生じるものとする。また構成要素に対しては、地震断層からの距離と破壊確率の関係を離散化し、破壊確率を持つ影響距離という概念を導入する。これは構成要素の破壊確率が  $p$  となるときに地震断層からの距離として定義する。その結果、各構成要素はいくつかの破壊確率に対応した複数の影響距離を持つ。また、破壊確率を持つ影響距離に対して、それを半径とする球体を定義し、これを破壊確率を持つ影響圏と定義する。従って、1つの構成要素に対して複数の影響圏が存在することになる。さらに影響圏が潜在的断層発生域と交わってできる影響域も、それぞれの影響圏に対応した破壊確率を持つ。これらの関係を図3に示す。各構成要素の影響域によって、潜在的断層発生域はいくつかの領域に分割されるが、いま潜在的断層発生域が影響域によって  $N$  個の領域に分割されるとする。 $i$  番目の領域の面積を  $A_i$ 、その領域で地震断層が発生したときのシステム全体が信頼性の評価基準を満足する確率を信頼性指標  $I_i$  で表す。本研究ではガス導管網の供給点から需要点までの連結性を信頼性の評価基準として、ネットワークシステム全体の地震時信頼性を評価する。また計算を簡略化するために、潜在的断層発生域上に評価点<sup>2)</sup>を等密度に分布させ、各領域の面積  $A_i$  をその領域に含まれる評価点の数  $M_i$  で代用する。これらを用いるとシステムの信頼度  $R$  は次式のように表現される。

$$R = \left( \sum_{i=1}^N I_i \cdot M_i \right) / M \quad (M \text{ は総評価点数}) \quad (3)$$

この信頼性解析手法を図4のノード12個、リンク11個の簡単なネットワークモデルに適用する。ここではノードD,Eの2点のみに距離-破壊確率が存在しているとし、それを図中のようにきざみを0.25として階段関数に離散化し破壊確率をもつ影響域を定義する。離散化によりノードD,Eともに破壊確率を持つ影響域が4個でき、これらの影響域によって、潜在的断層発生域は12の領域に分割される。また潜在的断層発生域上には評価点を図に示すように等密度に分布する。評価点の数はこの例では300個である。システムの信頼性の評価基準としてノードA,BからノードK,Lへの連結性を考える。まず各領域の信頼性指標  $I_i$  を求める。ここで

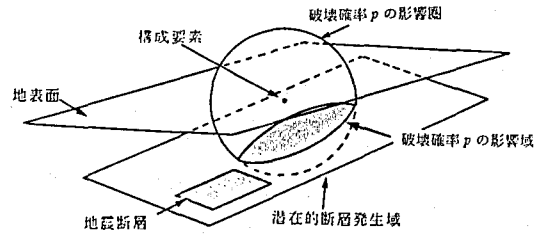


図3 影響圏、潜在的断層発生域、地震断層、影響域の関係

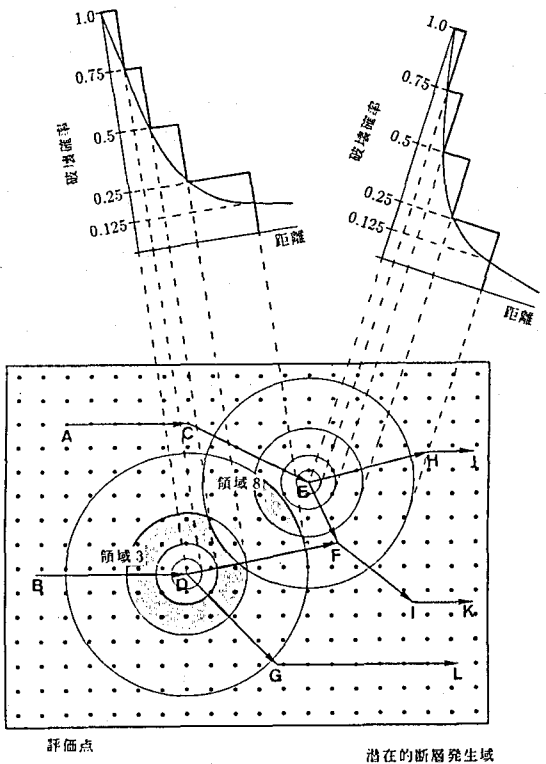


図4 簡単なネットワークモデル

表-1 事象空間法による信頼性指標の計算例

	ノードD	ノードE	信頼性基準	確率
1	破壊	破壊	満足しない	$(1 - 0.25) \times 0.5 = 0.375$
2	破壊	非破壊	満足しない	
3	非破壊	破壊	満足する	
4	非破壊	非破壊	満足する	
				信頼性指標 $I_B = 0.750$

は領域3と領域8についてのみ具体的に考える。領域3に地震断層の中心がある場合ノードD,Eはそれぞれ破壊確率0.5,0.0となる。

信頼性の評価基準がノードK,Lへの連結性であるから、ノードDが破壊するとノードLへの連結性が満足されなくなる。逆に、ノードEが破壊してもノードDが破壊していなければ信頼性評価基準は満足されることから、ノードEは破壊しようがしまいがシステムの信頼度には影響を及ぼさない。従って、ノードDの破壊しない確率が領域3の信頼性指標 $I_3=0.5$ となる。また、領域8に地震断層の中心がある場合には、ノードD,Eそれぞれ破壊確率0.25,0.5である。これら2要素に対して事象空間法によって信頼性指標 $I_8$ を求めると、表1から $I_8=0.75$ となる。このように各領域での信頼性指標を同様に求め、さらに各領域に含まれる評価点の数を求めると表2になる。これから信頼度は0.9108となる。

領域番号	信頼性指標 $I_i$	評価点数 $M_i$	$M_i \cdot I_i$
1	1.0	177	177
2	0.75	44	33
3	0.5	12	6
4	0.25	6	1.5
5	0.0	1	0
6	0.5	2	1
7	0.75	11	8.25
8	0.75	2	1.5
9	1.0	31	31
10	1.0	8	8
11	1.0	4	4
12	1.0	2	2
計		300	273.25

信頼度  $R = \left( \sum_{i=1}^{12} I_i \cdot M_i \right) / \sum_{i=1}^{12} M_i = 0.9108$

#### 4. 大規模ライフラインシステムへの適用

本研究の地震時信頼性評価手法を、東京ガス(株)の湘南地区中圧A導管網に適用する。中圧A導管網は387個のノードと391個のリンクからなるネットワークモデルとなる。供給点は4点あり、需要点は中圧A導管と中圧B導管の接続点147点を考え、この需要点すべてに供給点から連結されることを、信頼性の評価基準として信頼性を解析する。供給点と需要点を表示したネットワークモデルを図5に示す。また、潜在的断層発生域としては図6に示す1923年の関東地震の断層域<sup>3)</sup>を考える。構成要素の破壊確率特性は、以下の3ケースを考える。

- (i) ばらつきを考慮せず、構成要素の破壊確率が0か1の2値問題の場合
- (ii) 加速度の距離減衰式のばらつきのみを考慮する場合
- (iii) 地震時ひずみの算定に関するばらつきを考慮する場合

解析結果であるネットワークの信頼度とマグニチュードの関係を図7に示す。また、システムが信頼性の評価基準を満足する確率 $I_i$ は潜在的断層発生域上で定義され、地震断層の発生位置の違いにより0から1の値を持つ。マグニチュード6.8を想定し破壊確率特性(iii)を考えた場合、図8のように信頼性指標の分布からシステムの信頼性の確率密度が得られる。この図の重心に対応する信頼性の値がシステムの信頼度となる。図9はシステムの信頼性がある値をとるとき、その値以上となる確率、すなわち超過確率を表した図である。このシステムの信頼性が $R_0$ を上まわっている確率は、システムの信頼性 $R_0$ が保証される確率、すなわち安全率である。図10は構成要素の破壊確率特性として(iii)を用いた場合の、システムの信頼性がある値以上となる確率、すなわちシステムの信頼性の安全率を表した図である。

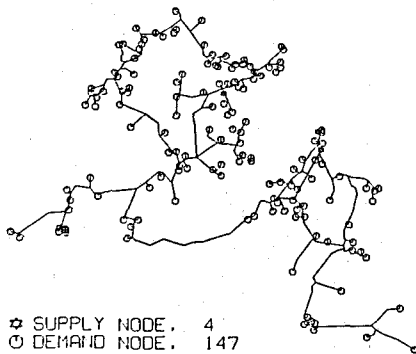


図5 信頼性評価基準が中圧A管とB管の接続点のときのネットワーク

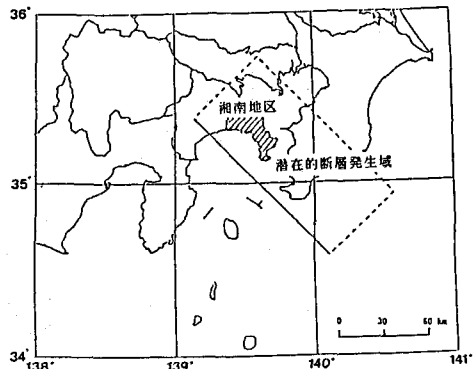


図6 関東地震(1923年)の断層モデルによる潜在的断層発生域

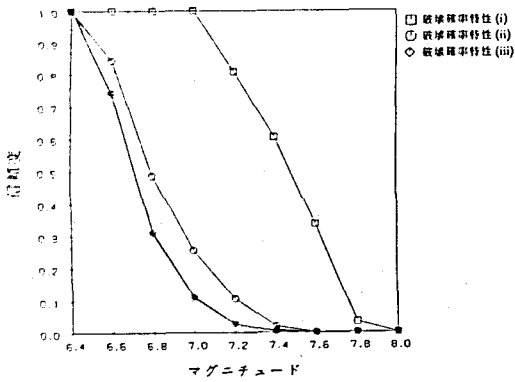


図-7 信頼性評価基準が中圧 A 管と B 管の接続点のときのマグニチュードと信頼度

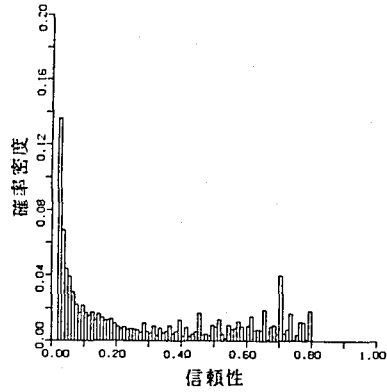


図-8 信頼性の確率密度

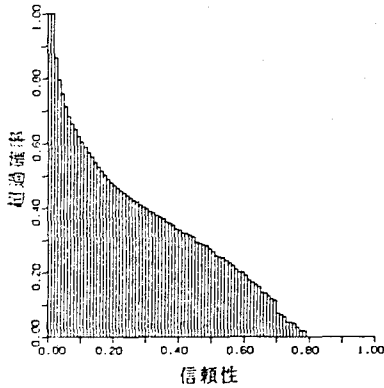


図-9 信頼性の超過確率

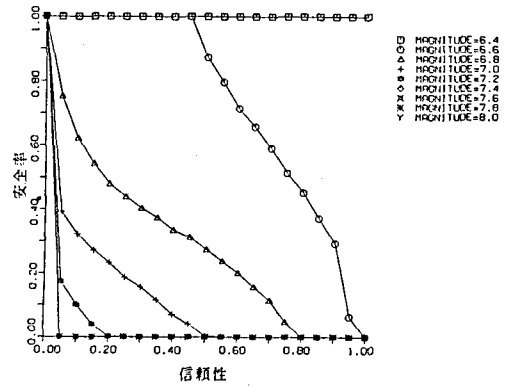


図-10 信頼性評価基準が中圧 A 管と B 管のときの信頼性と安全率

参考文献

- 1) Sato T. : Seismic Reliability Analysis of Lifeline Networks Taking into Account Fault Extent and Local Ground Condition, Natural Disaster Science, Vol16, No2, pp.51-72, 1982
- 2) T.Sato・K.Toki・H.Hamada : A Method for Analyzing Seismic Reliability of Realistic Large Lifeline Networks, 第 8 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2115-2120, 1990 年 12 月
- 3) 金森博雄・安藤雅孝 : 関東大地震の断層モデル, 関東大地震 50 周年論文集, pp.89-101, 1973 年