

## (133) 構成要素の破壊確率分布を考慮した大規模ライフライン系の地震時信頼性解析

京都大学防災研究所 正員 佐藤忠信  
京都大学防災研究所 正員 土岐憲三  
京都大学大学院 学生員 清水謙司

**1. 概説** ネットワークを構成する各要素に対して、地震時における破壊の不確定性を考慮し、ネットワーク全体の地震時信頼性解析を行った。ネットワーク構成要素に破壊確率分布特性が与えられることから結果としてネットワーク全体の信頼度基準に対する信頼性指標も分布特性を持つことになる。この分布特性を評価することにより、ネットワークの地震時における安全性の評価が的確に行えるようになる。この手法を大規模ガス供給ネットワークへ適用し、安全性についての検討を加えた。

**2. 構成要素の影響圏** ネットワークは、接点であるノードと、それらを結びリンクから構成されている。これらネットワークの各構成要素の地震時の破壊レベルを支配する変量を $Y$ とすると、 $Y$ は断層からの最短距離 $r$ 、マグニチュード $M$ 、地盤やネットワークの各構成要素のパラメータ $C_k$ の関数として、次式のようなアテニュエーション則で与えることが可能である。

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

いまここに、ネットワーク構成要素の破壊に対する許容レベルとして $Y^*$ を与えれば、式(1)から逆に要素が破壊にいたる臨界の距離 $r^*$ が得られる。

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

この $r^*$ を限界震源域距離、そしてこれを半径とする球を影響圏と定義する。

また、地震の震源域として二次元的広がりをもつ潜在的断層発生域を想定する。そして、地震断層の発生確率分布は、この潜在的断層発生域内において一様であると仮定する。さらに簡単のために、潜在的断層発生域と地震断層は相似な長方形で近似できるものとし、断層の長辺・短辺は、常に潜在的断層発生域の長辺・短辺に平行であるものとする。そして、断層の長辺・短辺の長さは、地震の表面波マグニチュードから得られる断層面積より算出する。

いま、潜在的断層発生域と影響圏が交わる面を影響域と定義する。図-1に、潜在的断層発生域、地震断層、影響圏及び影響域の関係を示した。影響域と交わる位置に地震断層が発生すれば、そのライフライン構成要素は破壊する可能性を持つ状態になる。

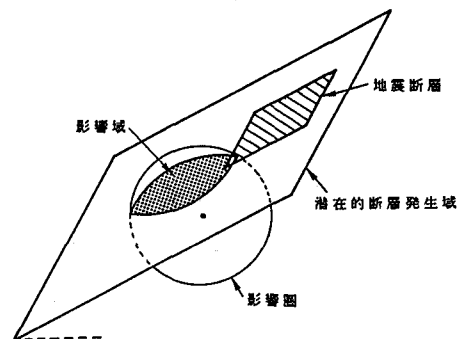


図-1 潜在的断層発生域、地震断層、影響圏、影響域

**3. 構成要素の破壊確率分布特性** ネットワークの地震時信頼性解析のアルゴリズム<sup>1)</sup>では、構成要素の影響圏を決定する際に用いる限界震源域距離の計算の際、導管の材料特性、形状特性、地盤の諸特性などをパラメータとして取り入れていた<sup>2)</sup>が、それらパラメータのばらつきや不確定性は考慮されておらず、また、最大加速度の距離減衰式や単位震度当りの応答速度の基準値などはそのばらつきを無視していた。こうしたばらつきや不確定性を考慮すると、限界震源域距離は確率密度特性を有したものとなる。実際には、各種パラメータの確率密度関数から解析的に誘導しなければならないが、それらパラメータの多様性や複合性のため厳密に求めることは困難である。そこで、限界震源域距離の確率密度分布が有限区間で定

義されるとし、これから各要素の破壊確率分布特性を定義した。この上限の限界震源域距離を上限限界震源域距離 $r_u^*$ と定義する。図-2は、構成要素の限界震源域距離が有限区間で、ベル型の確率密度分布特性を持つ場合である。このとき破壊確率分布特性は図-3のようになる。限界震源域距離の確率密度関数 $f(r)$ 、破壊確率分布関数 $F(r)$ には次式の関係がある。

$$F(r) = \int_r^{r_u^*} f(x) dx \quad (3)$$

以下では、連続量であるネットワーク構成要素の破壊確率分布を、離散量として取り扱う。離散化された破壊確率分布は図-4に示すようにステップ状であり、上限限界震源域距離 $r_u^*$ の内側で定義される。

複数の構成要素からなるネットワークの場合は図-4で定義された離散化された破壊確率分布特性によって潜在的断層発生域が分割されることになる。これを図-5に示した3個のノードと3個のリンクからなるネットワークの例で示す。いま、リンクACとノードBの2個の構成要素に破壊確率分布特性が与えられているとする。図-6の実線による図形は、上限限界震源域距離 $r_u^*$ により定義される上限影響域を表し、破線による図形は連続量である破壊確率分布特性を、離散量として取り扱ったときの境界により定義される小影響域である。また、実線の上限影響域どうしにより分割される領域を上限領域、上限影響域や小影響域により分割されるてできる最小の領域を小領域と定義する。いま、潜在的断層発生域内で地震断層が発生したとすると、その地震断層の発生位置により、破壊する可能性のあるネットワーク構成要素の組合せが、上限領域によって一義的に決定される。しかし、この

一義的に決定された各構成要素が破壊確率分布特性をもつために、上限領域中の小領域ごとに信頼度基準を満足する確率、信頼性指標 $I$ が異なる値をとる。つまり、信頼性指標 $I$ は潜在的断層発生域内で小領域ごとに0.0から1.0までの様々な値をとる。例えば、 $I=0.0$ とは信頼度基準を満足することが不可能であることを表し、 $I=0.7$ なら、0.7の確率で信頼度基準を満足するということを表す。

#### 4. 信頼性指標算定のアルゴリズム

ネットワークの信頼度基準を供給点から需要点へ到達すること、すなわち結合性とすると、Depth-First-Search (DFS) アルゴリズムが有用である。このDFSアルゴリズムはネットワークの始点から通路を順に探索し、終点に到達するためにネットワーク内の全てのtreeを効率的に最小時間で見いだすものである。DFSアルゴリズムを適用した結果、指標DFSが得られるが、これは0か

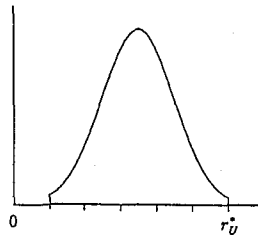


図-2 限界震源域距離の発生確率密度関数

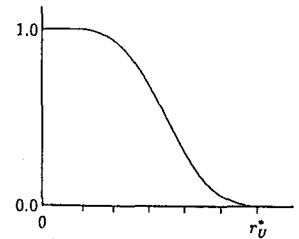


図-3 構成要素の破壊確率分布関数

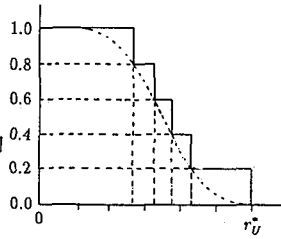


図-4 構成要素の破壊確率分布関数の離散化

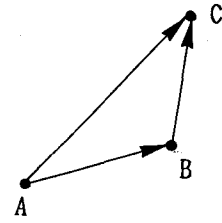


図-5 ネットワークの例

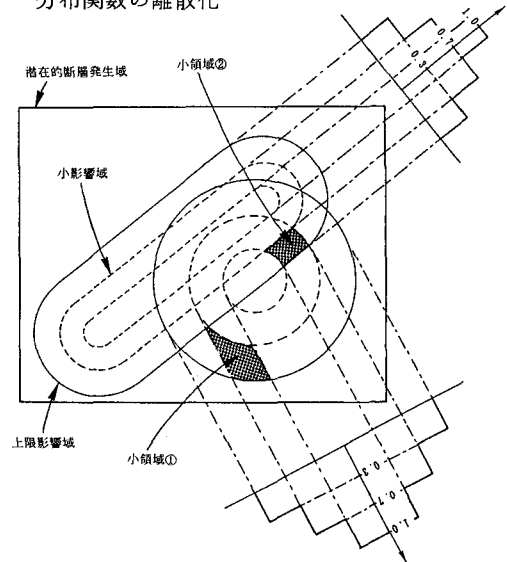


図-6 上限影響域, 上限領域, 小影響域, 小領域の定義

1しか値をとらない。すなわち、指標DFS=1なら結合性の信頼度基準を満足し、指標DFS=0なら信頼度基準を満足しないことを示す。

以下に、図-6のネットワークの小領域①と②の場合について、信頼性指標Iの算定方法を説明する。信頼度基準はノードAからノードCに結合可能であることとする。まず最初にネットワークにDFSアルゴリズムを適用する。ただしこの時、その小領域に地震断層が発生すると破壊する可能性を有する要素は、破壊している状態と考える。つまり、小領域①ではノードBが、小領域②ではノードBとリンクACが破壊している状態と考える。

DFSアルゴリズムを適用した結果、指標DFS=1なら、この小領域で地震断層が発生したとしても、ネットワークは結合性の信頼度基準を満足し、信頼性指標I=1.0となる。小領域①ではノードBが破壊している状態と考えても、リンクACが破壊しないことから信頼度基準は満足されるので、信頼性指標I=1.0となる。

指標DFS=0の場合、この小領域で地震断層が発生すると、ネットワークは結合性の信頼度基準を完全に満足することができない。そこで、その小領域で地震断層が発生すると破壊する可能性のある要素だけを抽出する。抽出された破壊可能性のあるn個の要素に対し、完全に破壊するしかないかの2通りの状態を考える。そして $(2^n-1)$ 個のネットワーク全体の損傷状態を考え、それぞれの状態について、再びDFSアルゴリズムを適用する。そしてDFS=1となる損傷状態の確率の和を計算し、それをこの小領域における信頼性指標Iとする。小領域②では、DFSアルゴリズムの適用の結果はDFS=0であるから、破壊する可能性のある要素としてリンクACとノードBの2個の要素を取り出す。この2個の要素に対して、完全に破壊するかしないかにより、3個の損傷状態を考え、それぞれに対してDFSアルゴリズムを適用する。リンクACとノードBの破壊確率は、図-6から0.3と0.7であるので、信頼性指標I=0.79が得られる。表-1に、以上の小領域①と②の信頼性指標Iの計算手法を説明した。

表-1 小領域①, ②の信頼性指標Iの計算手法

	小領域①	小領域②					
1st DFS	DFS=1	DFS=0					
2nd DFS		破壊可能性を有する要素		DFS=1	0.3X(1.0-0.7)=0.09		
		リンクAC	ノードB				
		破壊する	破壊しない			DFS=1	(1.0-0.3)X0.7=0.49
		破壊しない	破壊する			DFS=1	(1.0-0.3)X(1.0-0.7)=0.21
信頼性指標I <sub>i</sub>	1.0	0.79					

一般に、この抽出される要素数nはネットワーク構成要素数Nと比較すると極めて小さくなる。これはこのアルゴリズムを大規模ライフラインネットワークに適用することの有用性の根拠になる。つまり、各小領域ごとの信頼性指標Iを求めるとき、ネットワーク構成要素全体についての組合せを考えていたのでは、 $(2^N-1)$ 個の状態を考えなければならない。さらに完全に破壊していないことが明かな要素に関しても、破壊する場合としない場合の2通りの状態を考えるという無駄を生じている。そこで完全に破壊しないことが明かな、すなわち地震断層がその上限影響域の内部にない要素は破壊しないものとし、破壊する可能性のある要素だけを抽出し、それらの要素の破壊するかしないかの2通りの状態を考え、抽出した要素に関する $(2^n-1)$ 個の組合せ損傷状態について検討するのである。

5. ネットワークの地震時信頼性解析 ライフラインの信頼度基準は、ネットワークの形式と信頼度解析の目的により様々な定義がなされる。信頼度基準として結合性をとるなら、それは供給点から需要点へ到達することと定義される。本研究では信頼度基準に、この結合性を採用する。また、ネットワーク構成要

素が破壊確率分布を持つことにより、ネットワーク全体の信頼性指標Iも確率分布特性を持つことになる。

この確率量である信頼性指標I<sub>i</sub>、潜在的断層発生域が分割されてできる各小領域の面積A<sub>i</sub>を用いて、ネットワークGのマグニチュードMにおける信頼度R(G|M)は次式のように表すことができる。

$$R(G|M) = \left\{ \sum_{i=1}^N I_i \cdot A_i \right\} / \sum_{i=1}^N A_i \quad (4)$$

また、信頼性指標Iの分布特性を表す指標として、分散、標準偏差、変動係数が考えられる。

6. 大規模ライフラインへの適用 図-7の湘南地区の中圧ガス管網に対して、大規模ライフラインシステムの地震時における信頼性の解析を行う。

このガス管網は、図-7に示すように388個のノードと392個のリンクからなるネットワークで、供給点を高圧管と接続する4個のガバナートし、需要点を中圧B管と接続する全てのノード(147個)としている。信頼度基準は、全ての需要点にいずれかの供給点から供給できることとする。また、上限限界震源域距離を算定するために必要な地盤定数・せん断弾性波速度などのパラメータは、湘南地区における649地点のボーリングデータ値から推定し、基盤としては、N値が50以上の層を考える。潜在的断層発生域としては、図-8に示す1923年の関東地震の断層域を想定する。また、各要素の限界震源域距離の確率密度分布が上限限界震源距離内で一様で、ネットワーク構成要素は図-9に示す5段階の離散化された破壊確率分布特性を持つとする。

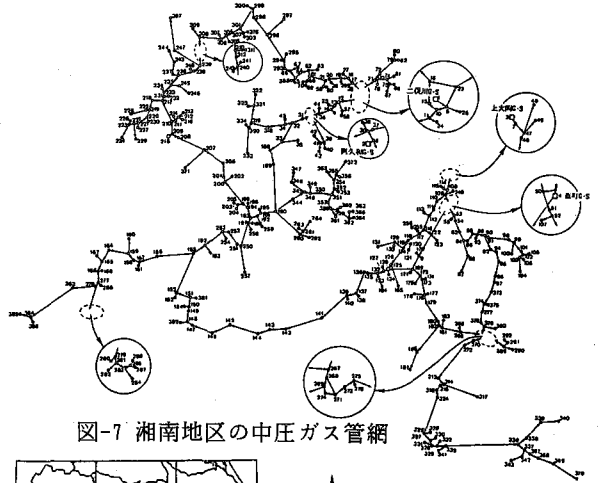


図-7 湘南地区の中圧ガス管網

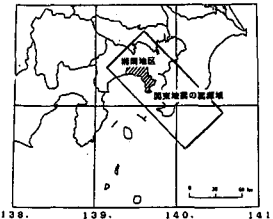


図-8 想定した潜在的断層発生域

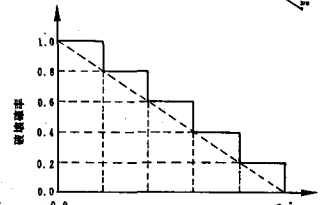


図-9 離散化された破壊確率分布関数

図-10、図-11は、マグニチュード6.1の地震が潜在的断層発生域上でランダムに発生したと仮定したときの、信頼性指標Iの分布特性と信頼性指標Iが1.0からの累積分布特性である。また、表-2は信頼性指標Iの分布特性を表す指標である。図-11から、ネットワークの信頼性がある値以上となる安全率を求めることができる。この場合、信頼性が0.80以上である安全率は約70%であることがわかる。

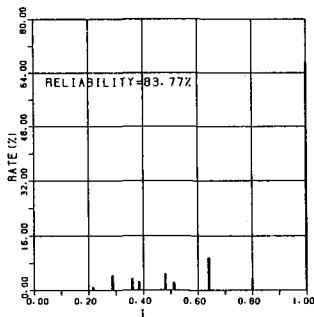


図-10 信頼性指標Iの分布特性

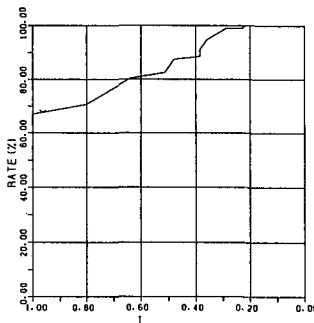


図-11 信頼性指標Iの累積分布特性

表-2 信頼性指標Iの分布特性を表す指標

信頼度	83.77(%)
分散	$0.627 \times 10^{-1}$
標準偏差	0.250
変動係数	0.299

参考文献 1) T.Sato: Seismic Reliability Analysis of Lifeline Networks Taking into Account Fault Extent and Local Ground Conditions, Natural Disaster Science, Vol6, No2, pp51-72, 1982年  
2) 日本ガス協会: ガス導管耐震設計指針, 1982年3月