

大規模ライフラインの地震時における信頼性解析法

佐藤忠信*・土岐憲三**・濱田尚人***

大規模ライフラインの地震時における信頼性を解析するためのアルゴリズムの開発とその高速化に関する研究を行った。まず、構成要素数の2乗のオーダーでネットワークの損傷状態の場合分けが可能なアルゴリズムを提案し、ベクトル計算機で処理可能なプログラムを開発した。さらに、選点法と名付けた近似解法を用い、汎用計算機を用いる場合でも、ベクトル化プログラムよりも高速で地震時の信頼性を計算できるプログラムを構築した。解析プログラムの有要性を検証するために、構成要素数が約3500と2万のガス管網の地震時信頼性解析を実施した。

Keywords : seismic reliability, lifeline systems, connectivity, depth-first-search

1. 緒 論

ライフライン地震工学の研究として、個々の構造要素の耐震性の研究というハード面^{1),2)}と、システムとしての機能評価や信頼性、震後の復旧方法などを研究するソフト面^{3),4)}の研究などがある。

本研究は、大規模なガス管網に対し地震時信頼性解析を行うための方法論を開発することを目的としている。大都市圏における実際の水道管やガス管網などでは、その構成要素数は少なくとも数万になるが、従来ライフラインの地震時における安全性を評価するために行われているシステム信頼性の解析では、計算機の容量や演算時間の関係で、実際のシステムを極端に単純化しなければ解析ができず、簡単な規模のライフライン系でも、その信頼性解析を厳密に行うことは困難であった。

このような問題点を克服する解析法⁵⁾として、地震の震源域に、2次元的な広がりを持つ潜在的断層発生域を想定し、ライフライン構成要素の影響圏を定義することにより、その構成要素数を n とすると、ネットワークの損傷状態の場合分け数を 2^n 個から $2n^2 - 2n + 2$ 個へ減少させる手法が開発された。この手法のもっとも基本的な概念である影響圏は、限界震源域距離（地震のマグニチュード、地盤条件などの関数）を半径とする球のつらなりで表される。影響圏は、ネットワークの各構成要素に対して定義され、ライフラインの要素が安全であるか否かの限界状態を表す。この影響圏を用いることにより、構成要素数が数百程度程度のライフラインシステムの地震時信頼性の計算が可能となった。

本研究では、この手法を継承、発展させることにより、

ネットワーク構成要素数が約3千と、約2万の2通りのガス管網に対し、地震時信頼性解析を行った。

まず、従来の信頼性解析プログラムをベクトル計算機向きにアルゴリズムを組み直し、ベクトル化することにより計算効率を高め、これまで計算時間の関係で実質的に解析不能であった、ネットワーク構成要素数が数千規模のガス管網に対し、信頼性解析を行った。

つぎに、上記のアルゴリズムを基本として、計算時間を短縮できる新アルゴリズム（これを選点法と名づける）を開発した。ベクトル化プログラムによっても、構成要素数が数万規模になるガス管網の解析に対しては、計算時間が長くなり、計算機使用コストの面から実用的でなく、またベクトル計算機は非常に高価であるため、その使用を前提とした解析法は汎用性があるとはいいがたい。本研究においては、汎用型計算機によっても大規模ライフラインシステムの地震時信頼性を解析可能とすることを前提とし、この新プログラムを開発し、ネットワーク構成要素数が約2万の、実大規模のガス管網に対し信頼性解析を実施した。

2. ネットワークの地震時信頼性解析手法

(1) 影響圏、潜在的断層発生域、影響域の定義

本研究で取り扱うネットワークは節点であるノードとそれを結ぶリンクとから構成される。ノードならびに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 、地盤や要素の力学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。

$$Y = F(r, M, C_k) \quad (k=1, 2, 3, \dots) \dots \dots \dots (1)$$

いま、要素の破壊に対する許容レベルとして Y^* が与えられれば式(1)から逆に要素が破壊に至る臨界の距離 r^* が得られる。

* 正会員 工博 京都大学防災研究所助教授
(〒611 宇治市五ヶ庄)

** 正会員 工博 京都大学防災研究所教授

*** 正会員 工修 熊谷組(株)技術研究所

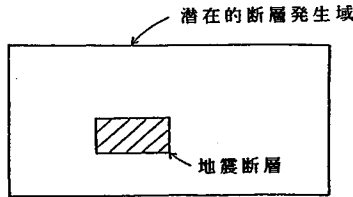


図-1 潜在的断層発生域と地震断層

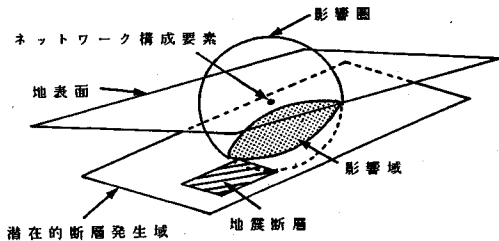


図-2 影響圏、影響域、潜在的断層発生域のイメージ

$$r^* = F^{-1}(Y^*, M, C_k) \quad (k=1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

この距離を限界震源域距離、これを半径とする球を影響圏として定義する。ノードの影響圏は球となる。また、リンクのそれは一方の端から他方の端へ限界震源域距離が線形に変化する無数の点からなると考える。

我が国におけるマグニチュード7以上の比較的大規模な海洋性地震の発生する領域はかなり明確に特定できるので、本研究ではこうした地震を対象とすることにし、2次元的な拡がりを持つ潜在的断層発生域を想定する。地震断層は、この潜在的断層発生域内にある特定の確率分布を持って発生するものと仮定する。そして地震断層の面積 S を次式のような関係式によって求める⁶⁾。

$$S = 1.88 \times 10^{-15} \times M_0^2 \quad (3)$$

ここに M_0 は地震モーメントである。さらに簡単のために潜在的断層発生域と断層は、図-1に示すように相似な長方形で近似できるものとし、断層の長辺、短辺は図中の斜線で表される長方形のように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。

図-2に影響圏と潜在的断層発生域の交面により、ある領域が形成されることを表した。断層と影響圏が交わる領域内ではライフラインの構成要素が破壊した状態になるが、こうした領域を定量的に評価するためには、断層の発生位置をその中心で表現し、その拡がりを見捨てるような座標系を利用すると解析が簡単になる。図-3は、断層の中心に着目した系への座標変換を表している。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。この場合、破線で示すような円で表現される交面ができる。断層の一端がこの交面と接するときの断層中心の軌跡が実線で示されているが、以後これを影響域と呼ぶ。なお、潜在的断層発生域は、両端をそ

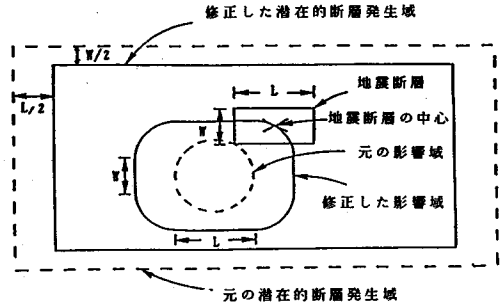


図-3 影響域と潜在的断層発生域

れぞれ対象とする断層の長さ L と幅 w に関して $L/2$ ずつ狭めたものとなる。各構成要素の影響域を描くと、いくつかの領域に潜在的断層発生域が区分され、それぞれの領域がネットワークの異なる損傷状態を表現している。

(2) ネットワークの信頼性計算

ライフラインネットワークの信頼性は、ネットワークの形式と信頼性解析の目的により様々な定義がなされている。そこで、次のような状態量を表す指標関数 $I(x, y | m)$ を定義する。

$$I(x, y | m) = \begin{cases} 1: \text{点 } (x, y) \text{ を断層の中心としてマグニチュード } m \text{ の地震が発生した後ネットワークが信頼性基準を満たすとき} \\ 0: \text{信頼性基準を満たさないとき} \end{cases}$$

結合性についてのみ考えれば、始点と終点が連結している場合には $I(x, y | m) = 1$ であり、そうでなければ $I(x, y | m) = 0$ である。この指標関数を用いることによって、ネットワーク G のマグニチュード m における信頼性 $R(G | m)$ は次式のように表すことができる。

$$R(G | m) = \int_c^d \int_a^b I(x, y | m) \cdot f_{xy}(x, y | m) dx dy \quad (4)$$

ここに a は潜在的断層発生域の左端の点、同じく b は右端の点、 c は下端の点、 d は上端の点である。 $f_{xy}(x, y | m)$ は発生する地震断層の中心位置の確率密度関数である。ここでは、簡単のため断層の発生は潜在的断層発生域において一様であるとする。

潜在的断層発生域は影響域によって複数の領域に区分されるが、この区分された領域のことを、小領域と名づける。ネットワークの損傷状態の場合わけは、各小領域内に地震断層の中心が発生することに一対一に対応する。

いま i 番目の小領域の面積を A_i 、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小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。

$$R(G|m) = \left(\sum_{i=1}^N I_i \cdot A_i \right) / \sum_{i=1}^N A_i \dots \dots \dots (5)$$

指標 I_i の値を決定するためには、信頼性基準により様々な手法が用いられる。結合性の問題においては、Depth-First-Search (DFS) アルゴリズム⁷⁾ が計算時間の観点から有用であるので本研究においてもこれを用いる。

(3) ネットワークの損傷状態数

n 個の円があるところに1つの円を加えると最大 $2n$ 個の交点ができ、小領域も $2n$ 個増えるので、 n 個の円から作られる小領域の数の上限は等差2の等差級数である。リンクの影響域とリンクの影響域が交わる場合には、交点の数は最大4個であるから、状態数の上限は等差4の等差級数となり、要素の数を n 個とすれば、

$$2 + \sum_{k=1}^n 4(k-1) = 2n^2 - 2n + 2 \dots \dots \dots (6)$$

である。この値は上限値であり、実際にはすべての影響域が互いに交わるようなことはまずないであろうから、ネットワークの損傷状態の組合せ数は、この値よりもさらに少なくなる。

3. 限界震源域距離の算出

本研究においては、地震時に被害が集中すると考えられている T 字管接合部の破壊評価のため、ガス導管耐震設計指針⁸⁾ に基づいて限界震源域距離を算出した。

また、ガス管はその埋設されている地盤の液状化により継手の離脱、亀裂、蛇行、流砂現象による浮き上がり等により大きな被害を受けることが報告されている。本研究においてはこの液状化による限界震源域距離を地盤の液状化の予測法である F_1 法⁹⁾ を用いて算出した。地盤の液状化による埋設管の挙動についての研究も過去においてなされているが¹⁰⁾、本研究においては簡単のため地盤の液状化が、そのままリンク部分の破壊につながるとして限界震源域距離を算出した。

限界震源域距離を算出するためには、要素の破壊レベルを支配する変量を断層からの距離 r とマグニチュード M の関数として表す必要がある。ここでは、次式の最大地震加速度の距離減衰式¹¹⁾ を用いて、最大地震加速度 α_{max} を r と M の関数として表した。

$$\alpha_{max} = 24.5 \times 10^{0.333M} \times (r+10)^{-0.925} \dots \dots \dots (7)$$

4. ネットワーク信頼性計算の高速化

(1) 従来の信頼性計算アルゴリズムのベクトル化

汎用型計算機で開発された FORTRAN プログラムは修正なしに、ベクトル計算機で実行できる。ベクトル計算機用にプログラムを修正しなくても単純なマトリックス計算などでは汎用型計算機の10倍以上の計算速度を達成できる場合もあるが、ベクトル化の基本条件を満たさない場合、ほとんど効果のない場合もある。

表一 信頼性計算の従来アルゴリズムと新アルゴリズムの CPU 時間の比較

マグニチュード		6.6	6.8	7.0
破壊可能性ノード数		10	39	136
厳密解を求めるアルゴリズム	汎用型計算機	130.92 sec	2956.49 sec	10800 sec 以上
	ベクトル計算機	23.86 sec	169.97 sec	315.99 sec
近似解による新アルゴリズム		10.41 sec	32.73 sec	58.83 sec

本研究においては、これまで開発してきたプログラムをベクトル計算機向きにチューニングし大幅な効率改善を行い、ライフラインシステムの構成要素数が数千のものについて、その地震時信頼性解析を実質的に可能とした。

プログラムの改良を効率よく行うためには、計算時間が長くなるプログラムの部分を検出することが重要である。そのため、実際のデータを実行させた時のプログラムの動的な振舞いを分析するためのソフトウェアがシステムに用意されており、本研究において使用した富士通のシステムには、このようなソフトウェアとして、FORTUNE、会話型ベクトライザが用意されている。

これらの動的解析ツールでは与えられた入力データに対して、被解析プログラムを実行し、その被解析プログラムの各文の実行回数と各文のベクトル計算機で実行する時の計算コスト、および汎用機での実行コストを計測し各文がベクトル化可能かどうか、および、その理由を表示する。そしてプログラム全体について各サブルーチンの実行コストを表示する。

表一に従来プログラムとチューニングを行ったベクトル化プログラムのマグニチュード 6.6, 6.8, 7.0 について後に述べる湘南地区のネットワークに対し実行した計算時間の比較、および次節で述べる選点法による計算時間の比較を示した。

厳密解を求めるアルゴリズムについて比較すると、マグニチュード 6.6 では約 5.5 倍、マグニチュード 6.8 では約 17.4 倍、そしてマグニチュード 7.0 では 34 倍以上の計算効率を実現している。なおマグニチュード 7.0 の場合、汎用型計算機により厳密解を求めると計算時間が 10800 sec 以上となっているが、これはこの時間内に計算が終了しなかったためである。

この表を見るとデータによって計算効率に差があるが、これは各データによってベクトル長 (ベクトル処理されるデータの個数) が異なるためである。マグニチュードが大きくなると、破壊する要素数が多くなり、ベクトル長はこの要素数の増大につれ長くなるため、計算効率は高くなる。そのため、マグニチュードが 7.0 より大きいデータの解析においては、その計算効率はきわめて高くなる。

(2) 選点法によるネットワーク信頼性計算法

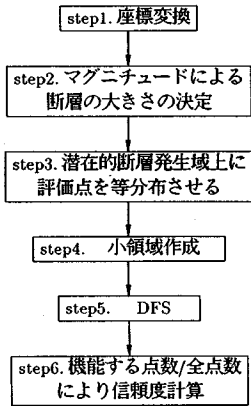


図-4 選点法による信頼性計算のアルゴリズム

本節では、新しく開発した選点法による近似解析手法について説明する。これは、従来プログラムのベクトル化により達成された計算速度をさらに高速化し、しかもこの計算を汎用型計算機で実現し、大規模ライフラインシステムの地震時信頼性解析を可能にしている。

このネットワーク信頼性の計算アルゴリズムは厳密解を求める手法とほぼ同じである。従来プログラムでは、影響域によって区分された各小領域に一对一にネットワークの各構成要素の損傷状態を対応させることができた。これと同様に、新しく開発した選点法は、潜在的断層発生域上に分布させた評価点の座標上に、地震断層が発生した場合、ネットワーク構成要素の損傷状態を調べ信頼性解析を行っている。この選点法の計算プロセスの効率化のために、各評価点の座標上に地震断層が発生した場合、ネットワークに対する損傷状態が同じとなる評価点群を見つけ出し、ネットワークの地震時における機能評価は、その評価点群の代表点によって行っている。これは従来アルゴリズムにおける小領域作成に対応する。

図-4に、この手法による信頼性計算のアルゴリズムを示し、この説明を行う。

Step.3において、評価点を潜在的断層発生域上に等間隔に分布させる。これは潜在的断層発生域内における、地震の発生確率を一様としたことと同等である。

Step.4により潜在的断層発生域が影響圏によって N 個の小領域に区分されているとし、 i 番目の小領域に含まれる評価点の数を K_i 、信頼性基準を $I_i(x, y | m)$ とすると、ネットワークの信頼性 $R_a(G | m)$ は Step.6 により

$$R_a(G | m) = \left(\sum_{i=1}^N I_i \cdot K_i \right) / \sum_{i=1}^N K_i \dots\dots\dots (8)$$

で求められることになる。

ネットワークの損傷状態に基づいて場合分けを行う基本的なアルゴリズムは厳密解も選点法も同じであるの

表-2 厳密解法と選点法の比較

	厳密解	新アルゴリズム	誤差
MAGNITUDE 6.6 需要点数 2 個	0.80063	0.80150	+ 0.00087
MAGNITUDE 6.8 需要点数 2 個	0.59270	0.59313	+ 0.00043
MAGNITUDE 7.0 需要点数 2 個	0.41237	0.41160	+ 0.00077

で、その複雑さのオーダーは式(6)で与えられたように $O(n^2)$ である。ただ、厳密解では小領域を構成している曲線と直線の組合せ、それらの方程式、小領域を構成する頂点の座標などを全て記憶しておく必要があり、これらに基づいて、小領域の面積を計算していた。このため、小領域の数の6乗に比例して計算時間が増加する結果となっていた。選点法では特定の選点がどの小領域に入っているかを記憶しておくだけでよいので、選点数のみに計算時間が比例することになり、小領域の数には関係しなくなるので計算効率が大きく改善された。

(3) 選点法と厳密解法の精度と計算速度

表-2に湘南地区のガス管網に対しガス導管耐震設計指針に基づいた場合の、マグニチュード6.6, 6.8, 7.0の各ケースについて評価点数を5千個とし、厳密解と新アルゴリズムによる解との比較を行った。いずれのケースにおいても誤差は小数第4位内に収まっており、実際の信頼性を議論する上で問題ないレベルにあることがわかる。

前出の表-1に選点法による新プログラムと厳密解を求めるプログラムの計算時間の比較を行った。これより、選点法は従来の汎用型計算機による厳密解算法に比して極めて高速であり、またベクトル計算機を用いた厳密解算法にたいしても相当の効率のあることがわかる。なお、用いた計算機は、従来の厳密解の解析を汎用型計算機で行う場合は、FACOM-M 780を使用し、ベクトル計算機によって厳密解を求める解析に対しては、FACOM-VP 400 Eにより計算した。選点法による解析はFACOM-M 780を用いて計算している。

5. 大規模ライフライン網への適用

(1) 湘南地区のガス管網と地震環境

本研究においては、湘南地区のガス管網を対象として信頼性解析を行った。湘南地区へのガスの供給は、ガス供給工場から図-5の太線で表される高圧導管を通過して a, b, c, d, e, f の6つのガバナーで図中の細線で表される中圧A管と中圧B管を経て一般家庭に供給されている。この中圧A管とB管からなるネットワーク網を地震時信頼性の解析対象とし、このネットワークを図-5に示すように1765個のノードと1764個のリンクで構成されるネットワークにモデル化した。供給点は上

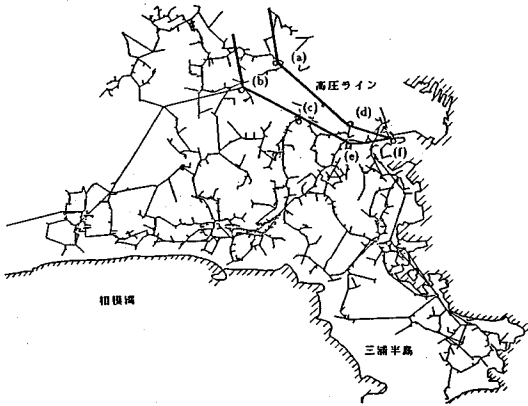


図-5 湘南地区のガス管網

表-3 潜在的断層発生域の諸元

パラメータ	関東地震
長さ (km)	130
幅 (km)	70
走向 (°)	N135°E
Dip Angle (°)	30°

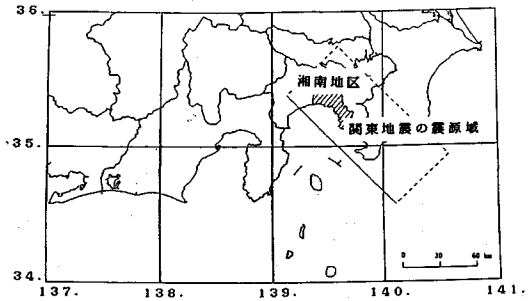


図-6 関東地震の潜在的断層発生域

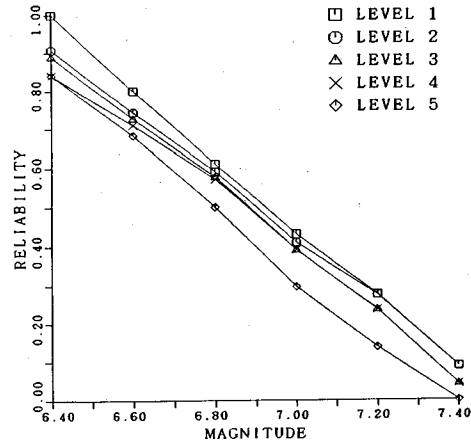


図-7 T字管ひずみによる破壊を考慮した各需要点レベルにおける信頼性比較

記6つのガバナー、需要点は中圧B管と接続するすべての低圧管ノード(640個)となっている。限界震源域距離を算出するための地盤情報としては地盤のN値、土の平均粒径、単位堆積重量などを知る必要があるが、これは湘南地区における1618地点のボーリングデータ値から推定した。

潜在的断層発生域としては1923年の関東地震の仮想断層域を考えこのパラメーターは金森・安藤¹²⁾にしたがって表-3のように定めた。

この潜在的断層発生域は関東地震の震源域より少し大きめに設定されている。この領域に将来どの程度の規模の地震が発生するかは明確ではないが、最大規模の場合は関東地震クラスのものが発生する可能性がある。そこで、地震規模として、マグニチュード6程度から8までの地震が発生するものと仮定した。

その断層と域湘南地区の位置を図-6に示す。この断層域を潜在的断層発生域と考えて信頼性解析を行う。

(2) ガス導管耐震設計指針⁹⁾に基づく信頼性解析

本節では、T字管部に発生するひずみによるノードの破壊に着目し、ガス導管耐震設計指針に基づいて構成要素の限界震源域距離を算出し、ベクトル化した信頼性解析プログラムにより湘南地区のガス管網の地震時信頼性の厳密解を求める。

ガスの需要量は各需要ノードにより異なっており、震後に需要量の多いノードに対しガスの供給を確保するこ

とは重要である。そのため、需要ノードでのガスの需要量に着目してこのノードを5つのレベルに分けた。設定したレベルは、需要ノードの下流側にある需要家の総ガス消費量の最大値と最小値を5等分して定めた。レベル1が5等分されたレベルの中で、最もガス消費量が多い需要ノードであり重要性が高い。以下レベル値が1大きくなるごとに消費量が少ない需要ノードに需要対象が変わる。また、需要ノードの数はレベル1から5まででそれぞれ、2, 10, 27, 116, 485個となっている。信頼性の基準は各レベルにおける需要ノードのすべてに対し、6つのいずれかの供給ノードから到達できることとした。

図-7に本節での解析結果を示す。各レベルともマグニチュードが大きくなるにつれ信頼性が低下している。レベルの値が大きくなるに従い需要点数は増えるため、同一マグニチュードでもレベル値の大きなものが信頼性が低くなる傾向がわかる。

(3) 仮想的ネットワークモデルの諸元

本節では、東京圏におけるガス管網から、一部分を取り出しそのネットワーク特性を参考にして、構成要素数約2万個の仮想的ネットワークモデルを構築した。

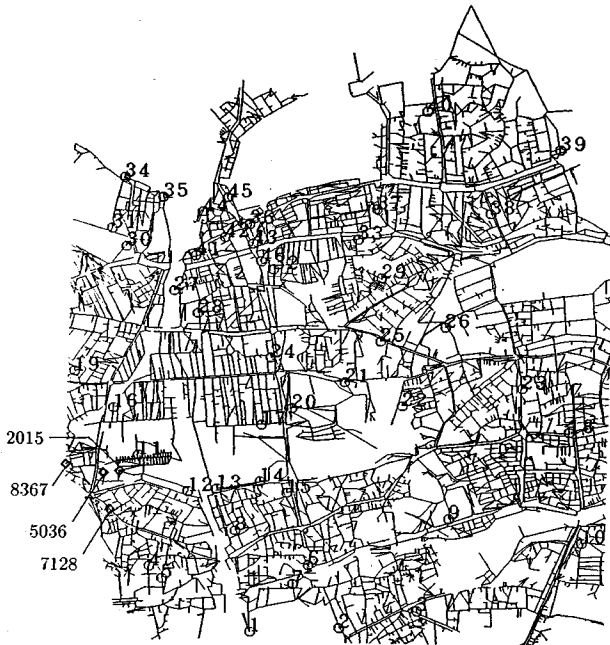


図-8 仮想的ネットワークモデル

図-8にこのネットワークを示す。○印をして数字を打ってある位置は供給ノードの位置であり、供給ノード数は46個である。そしてこの供給ノードから2144か所の需要点にガスを供給している。このネットワークは、9024個のノードと10498個のリンクで構成される、極めて大きなネットワークであり、この構成要素の数からいって、実大規模のガス管網モデルであるといえる。

限界震源域距離を求めるための地盤データは、このネットワークが仮想的に位置するとした地点近傍における1342ヶ所のボーリングデータを用いた。

本研究では、このネットワークを中圧管網と仮定して扱う。ネットワークの座標系は仮想の地理上の原点を設定しこの座標系を完成した。図-9にこのネットワークと関東地震の潜在的断層発生域との位置関係を示した。

(4) 仮想的ネットワークの特定需要点に対する信頼性解析

このネットワークは非常に入り組んだ構造をしており、ネットワークの冗長性が信頼性に与える影響を論じることができる。これを目的として本節では、供給ノードから需要ノードへのツリーの冗長性が少ないものと多いものの例をとりあげ、特定需要点に対しガスが供給できることを信頼度基準として地震時信頼性解析を行う。

解析には選点法を適用し、T字管のひずみによるノードの破壊と、液状化によるリンクの破壊の両方の影響を考慮して構成要素の限界震源域距離を算出し、地震時の信頼性解析を行う。この際、信頼性を比較すべき各需要ノードと潜在的断層発生域間の距離が著しく異なると、

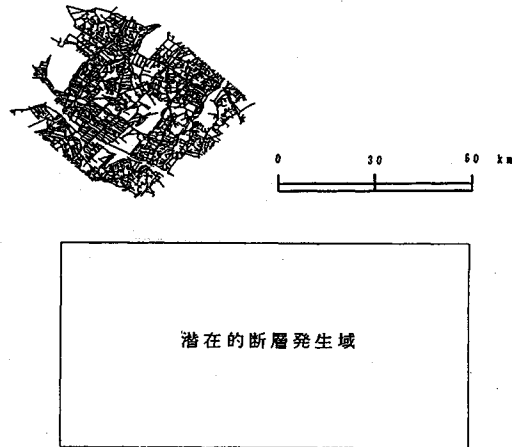


図-9 仮想的ネットワークと潜在的断層発生域の相対位置

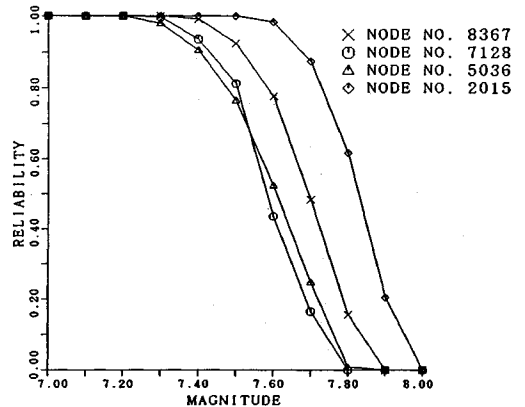
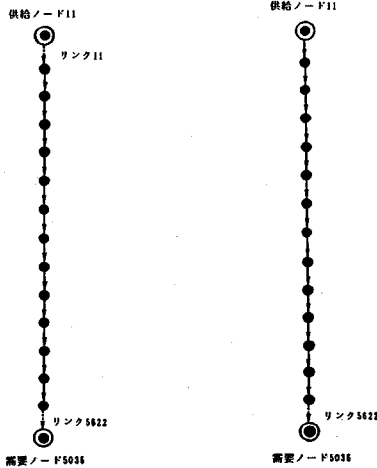


図-10 4つの特定需要ノードに対する信頼性比較

その距離による信頼性の相違なのか、冗長性のための信頼性の相違であるのか区別できなくなる。そのため比較すべき需要ノードは各需要ノードの座標の近いものを取っている。4つの各需要ノード、2015、5036、7128、8367について想定地震のマグニチュードを7.0から8.0まで変化させ信頼性比較を行う。この4つの需要ノードのそれぞれの地震時信頼性を図-10に示す。

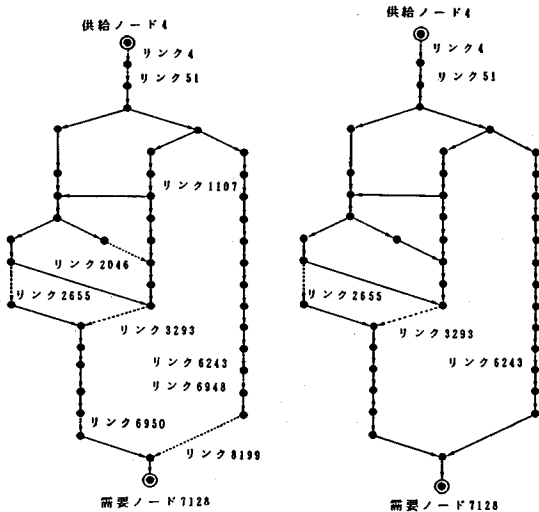
ノード番号は大きいものほど、供給ノードからその需要点までのツリーに含まれる構成要素が多くなっている。したがって、ツリーの中に含まれている冗長性が少なければノード番号の若いものの程信頼性は高くなるはずである。図-10では需要ノード2015への信頼性が最も高く、上で述べたことを裏付けているが、他の3つの各需要ノード8067、7128、5036については各需要ノードに対する信頼度の関係は必ずしもこのような傾向を示しているとはいえない。

本解析で用いたD.F.Sアルゴリズムは供給ノードか



(a) (マグニチュード7.7) (b) (マグニチュード7.4)

図-11 供給ノードから需要ノード5036へのツリー構造



(a) (マグニチュード7.7) (b) (マグニチュード7.4)

図-12 供給ノードから需要ノード7128へのツリー構造

ら需要ノードへのツリー構造を比較的簡単に決定する事ができるので、地震時にどの構成要素が重要なものとなっているのかを抽出することが可能である。

以下、需要ノード5036, 7128について求められた信頼性に対する考察を加える。供給ノードから各需要ノードへのツリー構造を図-11, 図-12に示す。丸印はノード、矢印はリンクを表し、それぞれマグニチュード7.4, 7.7のときの破壊可能要素を点線で示す。

図-10中において、需要ノード7128と5036は、マグニチュード7.5までは、7128の方が信頼性が高い。図-11(b)を見れば需要ノード5036は、供給ノード11から一本のパスだけで連結されており冗長性が全くないため、破壊可能要素のリンク5622の影響域の大き

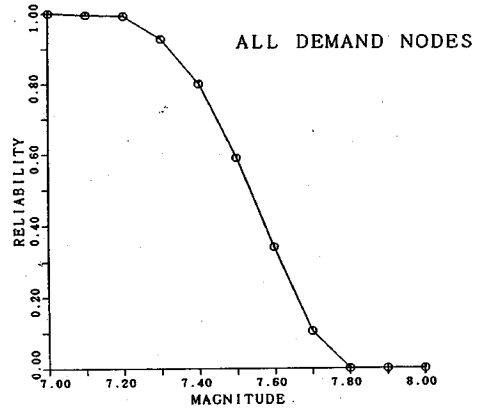


図-13 全ての需要点対象の地震時信頼性解析

さが信頼性を決定する。また、需要ノード7128は図-12(b)を見ると、供給ノード4から複数のパスをへてこのノードに連結される冗長性のあるツリー構造になっている。よって、図-12(b)の破壊可能性リンク2655, 3293, 6243のどれかの要素が破壊しても他のパスにより供給ノードから需要ノードへの連結性が確保され、結果的にこのマグニチュードの範囲では需要ノード7128の方が需要ノード5036よりも信頼度が高い。

次に、図-10中においてマグニチュード7.6から7.8までは需要ノード5036の方が需要ノード7128よりも信頼性が高くなっている。この理由としては、マグニチュード7.7についての需要ノード7128のツリー構造図-12(a)から推察できる。図-12(a)では破壊可能要素が合計10個あり、それらの位置もツリーに分散している。一方、需要ノード5036は図-11(a)のツリー構造において、破壊可能要素は2つだけである。対象地震の規模が大きくなってくると破壊可能要素数は増加する。そのため、供給ノードから需要ノードへのツリー構造がある程度冗長性を持っていても、地震規模の拡大に伴い、もはやその冗長性は地震時信頼性確保に寄与しなくなり、供給ノードから需要ノードにいたるパスで多くの構成要素を通っているため、破壊可能要素数が増えかねて不利となり得ることが分かる。

(5) 仮想的ネットワークの全ての需要点を対象とした場合の地震時信頼性解析

本節ではこの仮想的ネットワークの46か所の供給ノードから、2144か所の需要ノードの全てに対し連結できることを信頼度基準として、地震時信頼性解析を行う。

図-13にこの解析結果を示す。このネットワークが湘南地区のネットワークに比べ高い信頼性を保つ理由は、第一にネットワークの位置が潜在的断層発生域からある程度離れた位置にあること、第二に46か所の供給

ノードがネットワーク全体に分散しており、供給ノードから需要ノードまでのツリー構造に冗長性が確保されていることが挙げられる。

また、図-7と図-13を比較してみると、前者の湘南地区の信頼性グラフは直線的であり、後者の仮想ネットワークの信頼性グラフは曲線的である。この理由に対する考察を行う。

後者の仮想的ネットワークはその構成要素数が2万規模であり、このようにネットワーク構成要素数が多いものに対する信頼度は、電気や数学の分野で扱われる信頼性工学の理論¹³⁾が適用でき、ネットワーク構成要素の破壊確率を統計学的に扱うことができる。信頼性工学では、信頼度を時刻 t までにシステムが故障しない確率と定義し、時間 t を確率変数とする分布関数 $R(t)$ によって下のように表している。

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_0^t f(t) dt \dots\dots\dots (9)$$

ここに $F(t)$ は累積故障密度関数（故障分布関数）、 $f(t)$ は故障密度関数である。信頼度をマグニチュード M までにシステムが故障しない確率とすると、

$$R(M) = 1 - F(M) = \int_0^M f(M) dz \dots\dots\dots (10)$$

ネットワーク構成要素の故障密度関数 $f(z)$ はその対象構成要素数が多い場合、あるマグニチュード M_a を中心とした正規分布の形になる。そのため信頼度は図-12のような正規型信頼度関数として求められ信頼度は曲線的なカーブを描く。

6. 結 論

本研究では、これまでに開発されてきた大規模ライフラインシステムの地震時信頼性解析プログラムを高速化し、実大規模のガス管網の信頼性解析を可能にすることを目標とした。

数値計算例には、湘南地区の約3千個の構成要素からなるガス管網モデルと、東京圏におけるガス管網の一部を取り出し、そのネットワーク特性を参考にして作成した、構成要素数約2万個の仮想的ネットワークに対し地震時信頼性を解析した。

対象地震としては関東地震を想定したが、本来地震はその規模、場所は確実に想定できないため、地震による被害は確率的なものとなる。この信頼性解析プログラムではこれを考慮するために、近未来に発生しうる地震の震源域を潜在的断層発生域と定義し、これとネットワーク構成要素の影響圏の概念を取り入れることによって、各構成要素の破壊確率を評価し地震時信頼性解析を行っている。

本研究で得られた成果を以下に列挙する。

(1) 従来の地震時信頼性プログラムをベクトル化す

ることによりプログラムの高速化を図り、ネットワーク構成要素数が数千規模のライフラインシステムの地震時信頼性解析を実質的に可能とした。

(2) 選点法による新アルゴリズムを提案し、ベクトル化した従来プログラムの計算速度以上の高速計算を汎用型計算機で実行することを可能とした。

(3) 選点法は従来プログラムから計算される厳密解に対する近似計算であるが、実用上問題ないレベルの精度を得ることを明らかにした。

(4) 大規模なネットワークの中に含まれる冗長性をD.F.Sアルゴリズムを利用することにより抽出可能とし、冗長性がライフラインシステムの地震時信頼性に及ぼす影響を推定可能とした。

なお、数値計算にはベクトル化プログラムを実行する場合は、京都大学大型計算機センターのベクトル計算機FACOM VP-400 Eを用い、選点法による解析には汎用型計算機FACOM M-780と汎用小型机上計算機ソニーNews-1850システムを用いた。

参 考 文 献

- 1) 浜田政則・安田 進・磯山龍二・恵本克利：液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究，土木学会論文集，第376号，pp.221~229，1986年。
- 2) 関口宏二・大石 博：埋設管路の液状化対策工法に関する実験的考察，土木学会論文集，第382号，pp.175~181，1987年。
- 3) 山田善一・家村浩和・野田 茂・小笠原洋一：反復分割法による震災後の上水供給系の時変信頼性解析，土木学会論文集，第326号，pp.1~13，1982年。
- 4) Sato, T., Toki, K. and Sekiya, T.: Identification and Upgrading of Critical Components for Improving Seismic Reliability of Large Lifeline Networks, Proceedings of the 3rd U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems, 1989.
- 5) Sato, T.: Seismic Reliability Analysis of Lifeline Networks Taking into Account Fault Extent and Local Ground Conditions, Natural Disaster Science, Vol.16, No.2, pp.51~72, 1982.
- 6) 金森博雄：地球科学8，地震の物理，pp.117~121，1978年。
- 7) Even, S.: Graph Algorithms, Computer Science Press, pp.55~68, 1979.
- 8) 日本瓦斯協会：ガス導管耐震設計指針，1982年。
- 9) 岩崎敏雄・龍岡文夫・安田 進：砂地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例，第5回日本地震工学シンポジウム講演集，pp.641~648，1987年。
- 10) Kitaura, M., Miyajima, M. and Suzuki, H.: Response Analysis of Buried Pipelines Considering Rise of Ground Water Table in Liquefaction Processes, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.4, No.1, pp.173~180, 1978.
- 11) 建設省：総プロ「新耐震設計法の開発」研究報告，新耐震設計法，1977年。
- 12) 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.

(1990. 4. 16 受付)

13) 齊藤嘉博: 信頼性の基礎数学, 電気大出版局, 1975 年.

A METHOD FOR ANALYZING SEISMIC RELIABILITY OF REALISTIC LARGE LIFELINE NETWORKS

Tadanobu SATO, Kenzo TOKI and Hisato HAMADA

For assessing the seismic reliability of large scale lifeline networks we developed an algorithm which had only polynomial complexity to enumerate paths in the network. Using this algorithm we have developed two program packages. One is composed of a vectorized program to increase computing efficiency and the other is a program coded by a new approximate calculation scheme, named as the point matching method. The vectorized program can solve seismic reliability of a network with up to 3 500 elements using the super computer, FACOM VP-400 E. If the number of elements of network exceed 3 500, only the point matching method can provide a feasible solution from the practical stand point of computing time. This program can also ran on a 32 bit desktop computer with the main memory of 16 MB and the operation time of 5.3 MIPS. This program package offers you an interactive capability, to select supply and demand nodes as well as show them on screen. To check the applicability of the program package, we considered two gas supply networks composed of 3 529 and 19 522 elements.
