

(136) 重要度解析に基づく大規模ライフライン網の地震時信頼性向上

京都大学防災研究所

京都大学防災研究所

京都大学大学院

○佐藤忠信

土岐憲三

関谷富彦

1 まえがき

ライフラインの地震時信頼性評価に関するこれまでの研究の多くは、ネットワークを構成する各要素に対して破壊確率を与えることによって、システム全体の破壊確率を求めることを目的としていた。この場合、各構成要素の破壊状態は相互に関連するので、各要素の破壊は条件付確率で表現される。したがって、各要素について破壊するかもしれないかの2つの状態だけを考えても、ネットワークの構成要素数を n とすると、システムの損傷状態としては 2^n 個の組合せを考えなければならなかった。したがって、 n が大きくなるとともに場合分けの数が指数的に増大し、こうした手法を大規模なライフライン網に適用することは困難であった。ここでは、こうした問題点を克服するために場合分けの数が $2n^2 - 2n + 2$ 個となるアルゴリズム¹⁾を用いて地震時信頼性を求めた。次のステップとして、ネットワーク全体の信頼性を最も効率よく向上させるために、改良や改善を加えるべき構成要素を重要度の高い構成要素と考え、構成要素の順序づけを行った。

2 ネットワーク構成要素の影響圏

ネットワー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。

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

今、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限界の距離 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と名付け、これを半径とする球を影響圏として定義する。ノードは点と考えることができるのでノードの影響圏は球となる。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球から成ると考え、図1(b)に示すような理想化を行う。この場合、リンクの影響圏は両端での限界震源域距離 r_1 と r_2 とリンクの長さにより完全に定義される。また、この影響圏の中に地震断層が発生すると、対象としているネットワークの構成要素は完全に破壊するものとする。

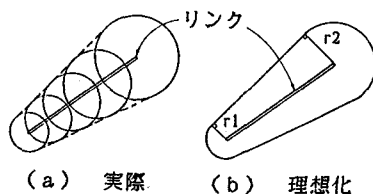


図1 リンクの影響圏

3 ネットワークの地震時信頼度評価法

(1) 潜在的断層発生域と影響圏 : 以下の解析では地震断層の面積 S が必要となるので、次式のような関係式を用いる²⁾

$$S = 1.88 \times 10^{-15} M_0^{2/3} \quad M_0: \text{地震モーメント} \quad (3)$$

我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できるので、ここ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確率分布を持って発生するものと仮定する。さらに簡単のために潜在的断層発生域と地震断層は、図2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。

地震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、その広がりを無視でき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。これは、破線で示した円をその中心で4象限に分割し、それぞれに対象とする断層の長さの1/2を加え、直線でつないだものである。リンクの影響域も同様に構成される。なお、潜在的断層発生域は、両端をそれぞれ対象とする断層の長さの1/2ずつ狭めたものとなる。

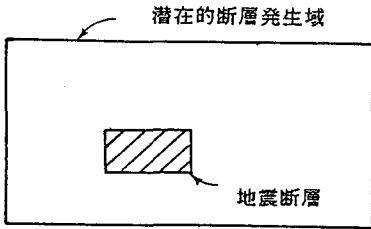


図2 潜在的断層発生域と地震断層

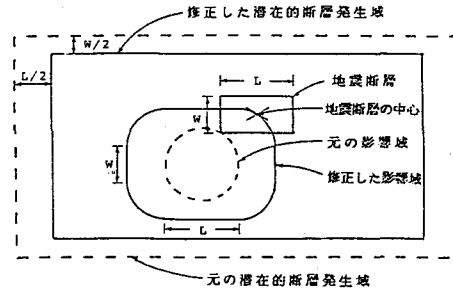


図3 影響域と潜在的断層発生域

(2) ネットワークの信頼度計算 : いま、次のような状態量を表す指標関数 $I(x, y | m)$ を定義する。

$$I(x, y | m) = \begin{cases} 1 \cdots \text{点}(x, y) \text{を断層の中心としてマグニチュード} \\ m \text{の地震が発生した後ネットワークが信頼度基準} \\ \text{を満たすとき} \\ 0 \cdots \text{信頼度基準を満たさないとき} \end{cases} \quad (4)$$

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。

以下では簡単のために、断層の発生確率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影響域によって 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 、指標を I_i とする。信頼度 $R(G | m)$ 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、

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

指標 I_i の値を決定するためには、信頼度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³⁾が有用である。

4 大規模ライフライン網への適用

(1) ガス管網と地震環境 : 本解析では、図4に示すように388個のノードと392個のリンクから成る中圧管のガス管網を対象とした。供給点を高圧管に接続するA、B、C、Dの4つのガバナーとし、需要点を中圧B管と接続する全てのノード(147個)として、信頼度基準を全ての需要点にいずれかの供給点から伝達できることとした。限界震源域距離を算出するためには、まず地盤定数、特にせん断波速度を知る必要があるが、これ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た。以下の解析では、 N 値が50以上の層を基盤とした。地震発生域として1923年の関東地震の想定断層域を考えた。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に基づく限界震源域距離 : 高圧ガス導管耐震設計指針に基づき、地震時に被害が集中すると考えられているT字管部についての限界震源域距離を算定する方法を略述する。

T字管部について、そのひずみの大きさ ε は次式で表される。

$$\varepsilon = \beta \cdot \Delta \quad (6) \quad \Delta = (1 - \alpha) \cdot U \quad (7)$$

ここに β は変換係数、 Δ は管と地盤の相対変位、 α は変位伝達係数、 U は表層地盤変位である。 α は地盤のバネ定数と管の材料特性、地震動の見かけの波長の関数であり、埋設管と周辺地盤の間にすべりが発生する場合も考え合わせてある。また U は次式で与えられている。

$$U = 2 / \pi^2 \cdot T \cdot S_v \cdot K \cdot \cos(\pi z / 2H) \quad (8)$$

ここに T は表層地盤の固有周期、 S_v は単位震度当りの応答速度スペクトル値、 K は地表面における水平震度、 z は埋設管の深さ、 H は表層地盤の層厚である。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、最大加速度の距離減衰式⁴⁾を用いて、震度 K を r と M の関数として表した。

$$K \cdot g = 227.0 \times 10^{0.308M} (r + 30)^{-1.201} \quad (9)$$

これらの式を用いて、 T 字管のひずみが1%になったとき破壊するとして、リンクの影響圏を計算し、関東地震の潜在的断層発生域上での影響域を計算することによって求めた信頼度が、表1である。関東地震の断層域はこのガス管網からの最短距離が10km程度であり大変近いので、マグニチュードが6~7の中程度の地震でも十分な信頼性は得られず、関東地震のマグニチュード7.3ではもはや信頼度基準を満たすことは不可能となる。

5 構成要素の順序づけ

(1) 信頼度の影響距離に対する変化率

影響距離が微少量 Δr だけ変化したときに、 ΔR だけ変化したとすると次式のような値が定義できる。

$$\frac{\Delta R}{\Delta r} = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta A_i}{\Delta r_j} \quad (10)$$

いま、影響距離をある一定の割合だけ変化させるための費用がどの要素についても同じであると仮定すれば、この変化率の大きいものから順番に改善していくことを評価基準とすることができる。この指標を用いて、図4のブロック②内の末端ノードに連結できることを信頼度の指標として構成要素の順序づけを行った結果が表2である。

(2) 重みづけを考慮にいたれた総合評価値

ライフラインシステムの構成要素の総合評価を行うために次式のような総合評価値を定義した。

$$T_j = \alpha_j \cdot \beta_j \cdot I_{mj} \quad (11)$$

ここで α_j は J 番目の構成要素の重み係数でありリンクを構成するパイプの外径、 β_j は J 番目の構成要素の地域重要度であり、地域重要度が高いと考えられるブロック②を対象とし、 β_j は1.0とした。 I_{mj} は J 番目の構成要素の重要度であり式(10)で与えられる変化率とした。表3にこの総合評価値を用いて順序づけを行った結果を示してある。

6 結論

地震時における大規模ライフライン網の信頼性を向上させるためには、全ての構成要素の強度を上げることによって達成されるが、数百個にも及ぶ構成要素全てについてそれらを行うことは、経済的に考えても不可能である。そこで構成要素の順序づけを行い、その順位の高いものから改善、改良を行うという方法が最も効率よく信頼度を向上させる方法であると考え、これらに順序づけを行うための方法論について考察を加えた。

参考文献

- 1) Sato, T., "Seismic Reliability Analysis of Lifeline Networks Taking into Account Fault Extent and Local Ground Conditions", Natural Disaster Science, Vol.6, No.2, pp. 51-72, 1984.
- 2) 金森博雄; 地球科学8 地震の物理, pp. 117-119, 1978年.
- 3) Even S.; Graph Algorithms, pp. 53-68, 1979年.
- 4) 川島一彦・相沢 興・高木義一: 最大地震動及び地震の応答スペクトルの距離減衰式, 土木研究所報告 第166号, 1985年9月.

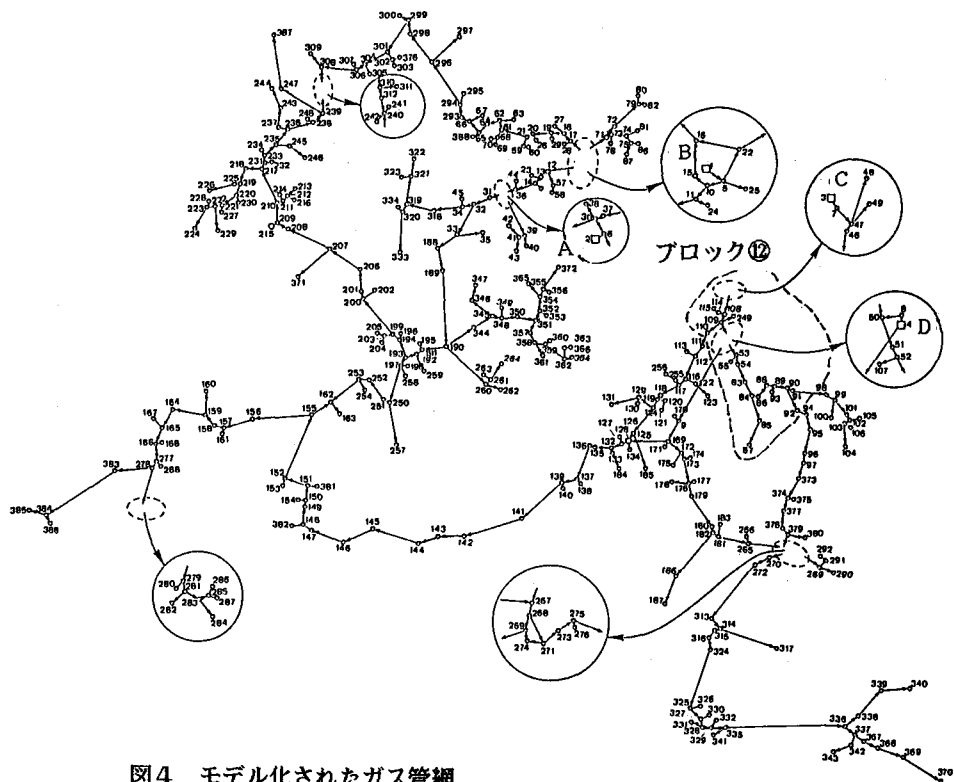


図4 モデル化されたガス管網

表1 ガス導管耐震設計指針
による信頼度

マニフールド	信頼度
6.0	0.882
6.1	0.794
6.2	0.726
6.3	0.661
6.4	0.590
6.5	0.514
6.6	0.454
6.7	0.400
6.8	0.340
6.9	0.271
7.0	0.194
7.1	0.107
7.2	0.009
7.3	0.000
7.4	0.000

表2 変化率による
構成要素の順序づけ

構成要素	$\Delta R / \Delta r$
リンク192	0.008767
リンク197	0.006521
リンク193	0.006520
リンク196	0.006510
リンク195	0.006498
リンク194	0.006295

表3 総合評価値による
構成要素の順序づけ

構成要素	外径	Tj
リンク192	40.6	0.3563
リンク193	40.6	0.2650
リンク196	40.6	0.2654
リンク195	40.6	0.2641
リンク197	31.8	0.2077
リンク194	16.5	0.1074