

(193) 地震時における大規模ライフライン系のファジィ信頼性解析

大阪ガス(株) 藤田裕介
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

1. まえがき

ライフラインシステムの地震時信頼性解析手法として影響圏という概念を用いる手法がある¹⁾。信頼性解析を行う際、地盤条件や経験式に含まれる不確定性を考慮しなければならない。

本研究では客観的な不確定性と主観的な不確定性を同時に考慮できる信頼性解析法を開発した。そこでは不確定要因のうちデータが数多くある地震動の最大加速度距離減衰式についての不確定性は従来通り確率論的に扱い、地盤条件からくる不確定性はファジィ理論に基づいて処理している。

2. ファジィ理論

ファジィ集合とは要素がその集合に属しているか属していないかが不明瞭な集合で、要素と帰属度、つまりその要素が集合に属する度合いの間の関係を示す帰属度関数で規定される。しかし帰属度関数の合理的な決定法が確立されておらず、本研究では三角形型帰属度関数を用い、また統計値と対応させるため頂点の値に平均値を、両裾に標準偏差を用いて設定した。いまファジィ集合の一つであるファジィ数の演算は α レベル集合を用いて行い、分解原理を用いて α レベル集合をファジィ数に復元する²⁾。但しファジィ数 A の α レベル集合とは $A_\alpha = [a_1^{(\alpha)}, a_2^{(\alpha)}]$ というある区間で表される集合である(図1)。

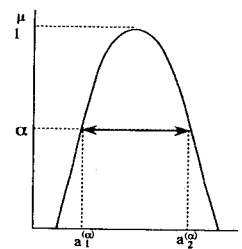


図1 帰属度関数と α レベル集合

3. ファジィ理論をとりいれた地震時信頼性解析法

本研究で解析対象にしているのは地中埋設ガス導管网だから、その破壊を規定する変量として地震時に発生するひずみを考える。構成要素に発生する地震時ひずみ ϵ を地震の規模、地震断層からの距離および地盤特性で表す際、ガス導管耐震設計指針や最大加速度距離減衰式を用いたが、表層地盤の固有周期を算出する際せん断弾性波速度を経験式から求めており、また距離減衰式自体が既往の強震記録を重回帰分析したものであるからその不確定性を考慮しなければならない。不確定性の処理についてデータ数の多い最大加速度距離減衰式は確率論的に扱えるが、固有周期などの地盤条件はデータがそろっていないとは限らない。この場合確率的な特性を規定するパラメータを決定できないことも多く、ある程度主観的な判断で不確定な量の値を決定しなければならない。そこで以下では確率論とファジィ理論の両者を混合して不確定性を取り扱う手法を開発する。

解析対象地区において、ボーリングデータがそれほど多くない場合、構成要素に一番近いボーリングデータをそのまま用いれるかどうか疑問である。そこで、本解析では、地盤条件がそのまま利用できる限界の距離を設定し、これを地盤情報の不確定基準と定義する。そして、この距離より構成要素とボーリングデータの距離が小さい場合を、あいまいさのレベルをファジィレベル1とし、大きい場合にはファジィレベル2とする。地盤条件として固有周期を考え、各ファジィレベルに応じ、異なる帰属度関数を設定する。

(1) ファジィレベル1における帰属度関数

ボーリングデータから得られた情報をその構成要素の埋設されている地点の地盤にもそのまま適用できるものとする。しかしこれは埋設地点の地盤情報を正確に表したものではないので、ファジィ数でその情報を与えて固有周期の帰属度関数を設定し解析する。

(2) ファジィレベル2における帰属度関数

(i) 解析対象地区のボーリングデータ数が多い場合

その解析対象地域のボーリングデータから表層厚と固有周期の関係をファジィ推論³⁾を用いて定める。本研

究の解析対象地区は、推論結果より表層厚は「浅い」と「深い」の2つのファジィ集合に分けられそれに基づき固有周期の帰属度関数の設定する。いま「深い」というファジィ集合を得たら、帰属度が0になる表層厚の最大値を H_1 とし、また、解析対象地域のデータの中で最も深い表層厚の値を H_2 とする。表層厚-固有周期の関係を用いて図2のように「深い」地盤に対する固有周期の台形型帰属度関数を設定する。

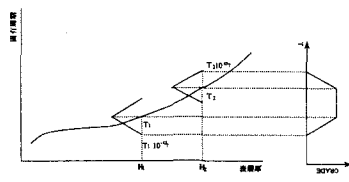


図2 帰属度関数の設定法

(ii) 解析対象地区のボーリングデータ数が少ない場合

同じ地形であればほぼ同じ地質構造を示すものと考えられる。表1に地形とおおよその土質とN値の範囲が示されている。今せん断波速度とN値は土質毎に経験式があり⁴⁾これらと表1のN値を用いて V_s の範囲が得られる。手法(i)との比較のため表層厚は「深い」とし、平均表層厚 H_1 から最深表層厚 H_2 の間の値をとるとして、表層厚-固有周期の関係を用いて図3に従い、微地形から平均表層厚 H_1 と最深表層厚 H_2 の固有周期の範囲を求め、固有周期の重なる範囲の所は帰属度を1とし、図のような固有値に対する台形型帰属度関数を設定する。

表1 地形と土質

地形	土質	N 値
扇状地	粗大な砂れき	30 以上
自然堤防	砂質土	10~20
後背浸地	粘土・シルト・細砂・ビート	10 以下
三角州	細砂・粘土・厚い軟弱層	5 以下
土砂供給の多い河川沿岸	砂れき	20 以上
小オオレ谷跡	粘土・シルト・ビート	5 以下
海岸砂州	砂・砂れき	15 以下
潟湖跡	粘土・シルト・ビート・細砂	5 以下

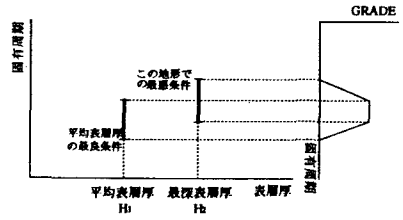


図3 帰属度関数の設定法

ファジィ化された固有周期の α レベル集合を $[T_1^{(\alpha)}, T_2^{(\alpha)}]$ とする (図4(a))。これから信頼度の α レベル集合 $[R_1^{(\alpha)}, R_2^{(\alpha)}]$ を求める。まず、 $T_1^{(\alpha)}$ から $R_1^{(\alpha)}$ を求める手順を示す。

α レベルの固有周期 $T_1^{(\alpha)}$ が決まると α レベルの地盤条件下の地震時ひずみの推定値 $\bar{\epsilon}^{(\alpha)}$ が

$$\bar{\epsilon}^{(\alpha)} = f_1^{(\alpha)}(r, M, C_k) \tag{1}$$

と表される。ここで、最大加速度距離減衰式を確率論で扱っているので、 α レベルの地震時ひずみ $\epsilon_1^{(\alpha)}$ はその推定値 $\bar{\epsilon}_1^{(\alpha)}$ のまわりでばらつき、構成要素の α レベルでの破壊確率は α レベルの地震時ひずみ $\epsilon_1^{(\alpha)}$ が破壊基準ひずみ ϵ^* をこえる確率で与えられる。これは図4(b)の斜線部の面積で示される。すなわち、 α レベルにおいてマグニチュード M 、構成要素から断層までの距離 $r_1^{(\alpha)}$ の時の破壊確率 $p(M, r_1^{(\alpha)})$ は

$$p(M, r_1^{(\alpha)}) = P(\epsilon_1^{(\alpha)} \geq \epsilon^*) \tag{2}$$

である。断層までの距離を変化させると、それぞれの距離における破壊確率が求められ、距離-破壊確率の関係式ができた。これで α レベルにおける、破壊確率 p を持つ影響距離 $r_1^{(\alpha)}$ が求められる (図4(c))。そしてそれを半径として球体で表される α レベルにおける破壊確率 p の影響圏が定義できる。また地震断層の発生する位置を2次元的な面で推定し、その面を潜在的断層発生域と定義し、 α レベルにおける破壊確率 p の影響圏と潜在的断層

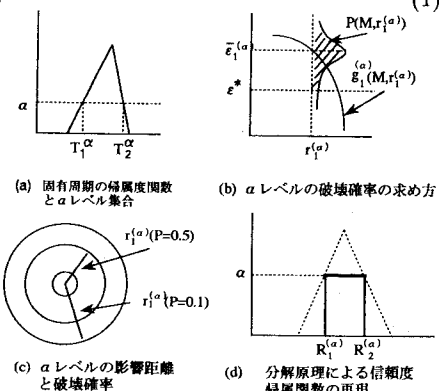


図4 信頼度のファジィ化手順

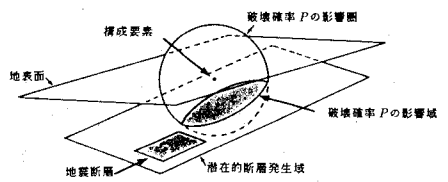


図5 潜在的断層発生域と影響圏

発生域が交わってできる領域を α レベルにおける破壊確率 p の影響域として図5にこれらの関係を図示する。

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する。潜在的断層発生域上に評価点を等分布させる。いま潜在的断層発生域が影響域によって N 個の領域に区分けられているとし、 i 番目の領域に含まれる α レベルの評価点数を $N_{1i}^{(\alpha)}$ とする。ここで α レベルにおける信頼性指標 $I_i^{(\alpha)}$ は領域 i で断層が生じた場合、信頼性評価基準を満足する確率とする。よって α レベルの信頼度は次式で与えられる。

$$R_1^{(\alpha)} = \frac{\sum I_{1i}^{(\alpha)} N_{1i}^{(\alpha)}}{\sum N_{1i}^{(\alpha)}} \quad (3)$$

もう一つの α レベル $T_2^{(\alpha)}$ についても同様の演算を行い、もう一つの α レベルの信頼度 $R_2^{(\alpha)}$ を得る。こうして $[R_1^{(\alpha)}, R_2^{(\alpha)}]$ が定まり、分解原理を用いると図4(d)のように信頼度 R の帰属度関数が求まる。

4. 大規模ガス管網のファジィ信頼性解析

本解析手法で用いる構成要素の影響距離 r^* を算定するための地盤条件は、湘南地区における649地点のボーリングデータである。この湘南地区で(i)解析対象地区のボーリングデータが多い場合、(ii)少ない場合の手法による解析結果を比較する。

まず(i)の場合、表層厚を「浅い」「深い」の2つにわけたモデルがファジィ推論で最適であることがわかったので図2をもちいて固有周期をファジィ化し湘南地区の解析を行う。(ii)の場合、地形の判読は土地条件図(藤沢地区)、土地利用図、地形図を利用した。

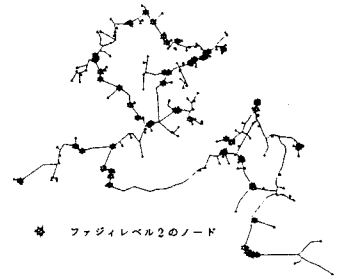


図6 湘南地区ネットワークモデル

4個の供給点と147個の需要点と地盤情報の不確実性がファジィレベル2に属するノードを表示したネットワークモデルを図6に示す。またここでは、ファジィレベル2に属するノードの表層厚に関し全て「深い」として解析を行った。

確率論のみの解析法で得た信頼度と(i),(ii)の両解析法で得た信頼度を比較したものを図7(a),(b)に示す。本解析では地盤の不確実性を考慮し信頼度の広がりを持つ帰属度関数を得ている。本解析では表層厚は一律に「深い」とし、その結果信頼度の値が従来より悪くなったが、解析者の判断で「浅い」「深い」の判断が取り入れることは可能である。次に(i),(ii)の両解析法について地盤情報の不確定基準距離が1.0km,0.75km,0.5kmである場合の信頼度の帰属度関数を比較したものを図8(a),(b)に示す。そして両手法の解析結果の比較を図9(a),(b),(c),(d)に示す。

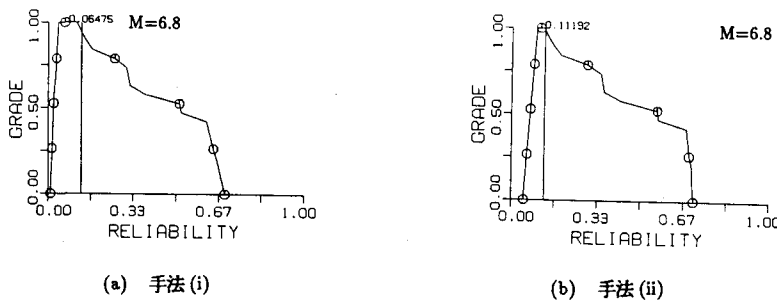


図7 確率論のみ取り入れた解析法との比較

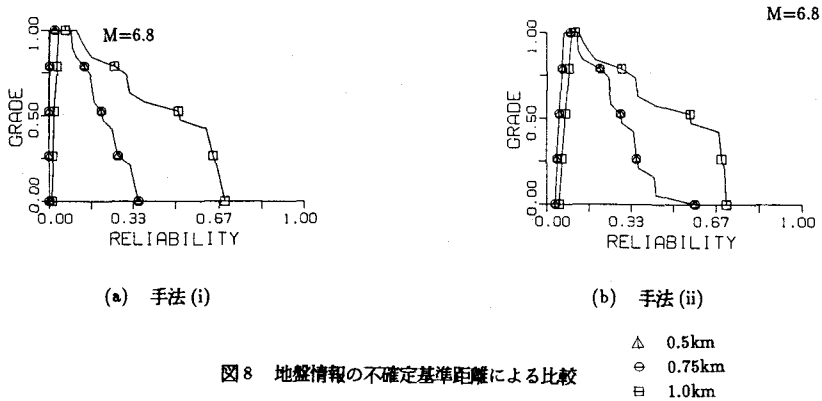


図8 地盤情報の不確定基準距離による比較

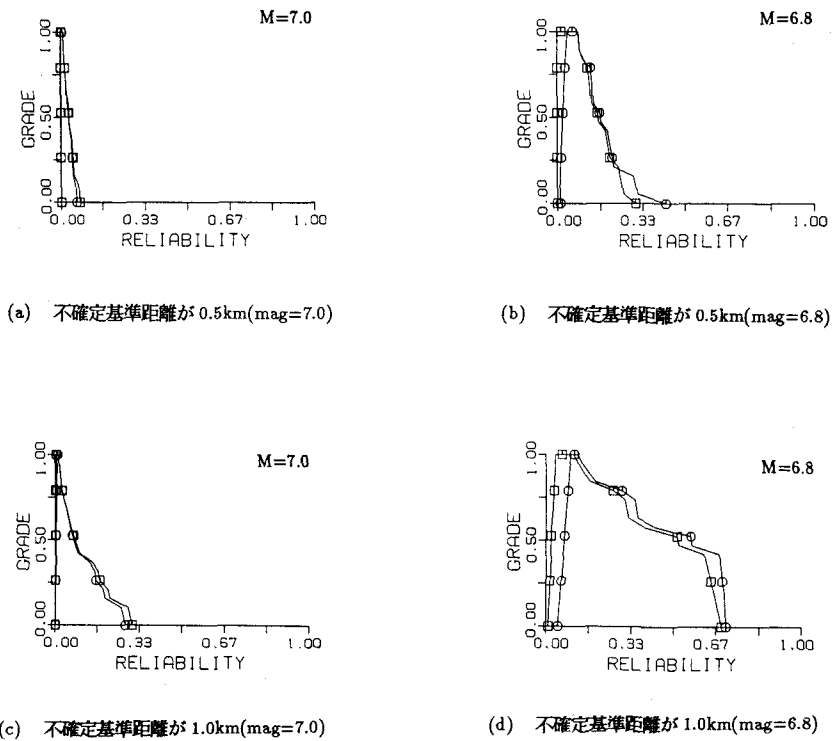


図9 地盤情報の不確定基準距離を変化させた場合の両手法の比較
 ⊕ 手法 (i)
 ⊖ 手法 (ii)

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) A.Kaufmann・M M.Gupta : Introduction To Fuzzy Arithmetic, Van Nostrand Reinhold Company, pp.1-35
- 3) 菅野道夫 : ファジィ制御, 日刊工業, pp.137-156, 1989年7月20日
- 4) 土木学会編 : 地震動・動的物性, 技報堂, pp.92, 1989年12月5日