

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

佐藤 忠信・土岐 憲三・藤田 裕介

SEISMIC RELIABILITY ANALYSES OF LARGE SCALE LIFELINE NETWORK USING FUZZY SET THEORY

By *Tadanobu* SATO and *Yuske* FUJITA

Synopsis

To evaluate uncertainty of network components requires a large and longterm statistical survey. We, therefore, attempt to use the fuzzy sets theory to assess the seismic reliability of large scale lifeline networks and taking into account uncertainty of failure probability of the components. We developed an algorithm which has only polynomial complexity to enumerate paths in the network. Using this algorithm we have calculated the fuzzy membership function of seismic reliability of a given networks. The uncertainty of the attenuation law, response velocity value per unit seismic coefficient and natural period of ground are defined by using normal convex fuzzy membership functions. A check of applicability of our new method is made by hypothetical seismic reliability analysis of a gas supply network composed of 387 nodes and 391 links.

1. ま え が き

今日の我国の都市は、巨大化・高度化し、産業や経済の発展に伴い、情報通信、交通、エネルギー、上下水道などの都市ライフラインのネットワークが複雑かつ高密度に発達している。従って、ライフラインシステムが震害を受けた場合、都市の機能が著しく低下し、住民の生活をはじめ、社会的・経済的影響は極めて大きいものとなる。そこで地震後その都市機能・住民生活に与える影響を最小にするためにライフラインの耐震化を図らねばならないが、それには既存のシステムの地震後の状態を正確に予測する必要がある。

ライフラインシステムの耐震性の評価指標として、地震後にシステムがどの程度信頼性の評価基準を満足するかという信頼度を考え、地震時のシステムの安全性を評価することが良く行われる。大規模な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開発されている¹⁾。この影響圏は、地震のマグニチュードや構成要素周辺の地盤条件などからその不確定性を考慮し求められる影響距離を半径とする球体として各構成要素について定義され、この中で断層が生ずればその構成要素はある破壊確率でもって破壊するというものである。

現象の不確定性を取り扱う手法には2種類の方法がある。1つは、確率論に基づき、客観的に評価できる確率変数としての不確定性を表現するものであり現象のランダム性であり、もう1つは解析者の経験と工学的判断により不確定性を主観的に評価するものであり、現象のファジィ性を取り扱うものである。

本研究では、まず全ての不確定要因をファジィ理論で扱い各要因のシステムの地震時信頼度に与える影響について考察を行う。次により現実的な信頼性評価を行うために、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を開発する。ここでは地震動のアテニュエーション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。地盤条件の不確定性については、ある基準の距離を設定し構成要素と一番近いボーリングポイントの距離が基準の距離より短ければボーリングデータの情報が利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あるのではないので、幅を持ったファジィ数を設定して、地盤条件の不確定性を表現する。基準の距離より大きければ利用できるボーリングデータがないので、解析対象地区のボーリングデータ数が多い場合は、そのデータから地盤情報のファジィモデルを作成し地盤情報をファジィ数で与え、ボーリングデータが少ない場合は微地形から地盤情報を推定し、その対象地点の地盤情報をファジィ数で与えることにした。

2. 地震時信頼性評価法

ライフラインシステムはネットワークを構成しており、二次元的に広がり、広範な地域に構成要素が分布しているため、システム内の数個の構成要素が地震時に破損・破壊すると、システム全体、あるいはその広範な部分が機能しなくなる可能性がある。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、ネットワーク構成要素それぞれの耐震性を評価するだけでは充分とは言えず、ネットワークシステム全体としての地震安全性も評価しておく必要がある。ここでは影響圏の概念を用いた解析手法を用いてネットワークの地震時信頼性を評価することにする。

ここでは、地中埋設ガス導管網の地震時信頼性を解析することを目的としているから、破壊を支配する変量として地震時に発生するひずみを考える。特に、地震時に被害が集中すると考えられるT字管部をノードと考え、このノードの地震時ひずみ ε を高圧ガス導管耐震設計指針²⁾ (以下、ガス指針とする) の設計基準に基づいて算定する。本研究では設計震度 K_{0h} のかわりにその地点での震度を用い、そして地震の大きさと地震断層からの距離を、構成要素の地震時ひずみ算定のための変数として導入するために、建設省土木研究所によって提案されている最大加速度の距離減衰式³⁾を用い、構成要素の地震時ひずみを

$$\varepsilon = F(r, M, C_k) \dots\dots\dots (1)$$

のように地震のマグニチュード、地震断層からの距離、地盤条件や構成要素の材料・形状特性などの関数として表現する。しかし地盤条件の不確定性、距離減衰式はばらついたデータを回帰分析して得た式であるので、算定される地震時ひずみはばらつきを持った値となる。構成要素の破壊・非破壊の臨界の値、すなわち破壊基準ひずみ ε^* は、ガス指針の許容ひずみとし0.01とする。

地震時ひずみ ε が破壊基準ひずみ ε^* をこえる確率 p が定義できれば、これをその構成要素の断層までの距離が r の時の破壊確率と定義でき、 r と M と C_k の関数として次式のように与えられる。

$$p(\varepsilon \geq \varepsilon^*) = G(r, M, C_k) \dots\dots\dots (2)$$

これを r について逆に解くと破壊確率 p をもつ距離 r が求められる。

$$r = G^{-1}(p, M, C_k) \dots\dots\dots (3)$$

式(3)より求められる r を破壊確率 p をもつ影響距離と定義する。この距離は、地震の大きさ、構成要素の材料・形状特性および構成要素周辺の地盤条件などから計算されるので、それぞれの構成要素に固有のものとなる。

さらに、構成要素を中心とし、破壊確率 p をもつ影響距離を半径とする球体を、破壊確率 p をもつ影響圏と定義する。ノードの影響圏は球体となる。地震断層が破壊確率 p の影響圏の内部で発生すれば、その影響圏を有する構成要素は破壊確率 p で破壊する。

また我国の太平洋側で生じる大地震は、その発生機構から、前もって地震断層の位置を2次元的な面で推定しておくことが可能である。その面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。

1つの構成要素に対して、Fig.1のような破壊確率と影響距離との関係が得られ、これを離散化して影

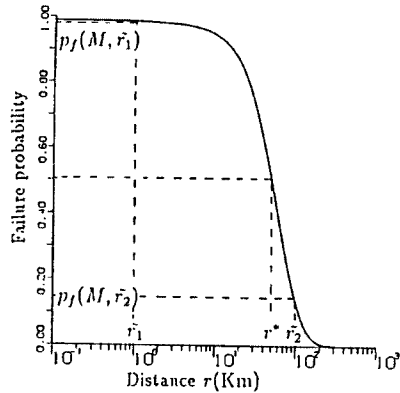


Fig. 1. Relation between failure probability of a component and the transition distance.

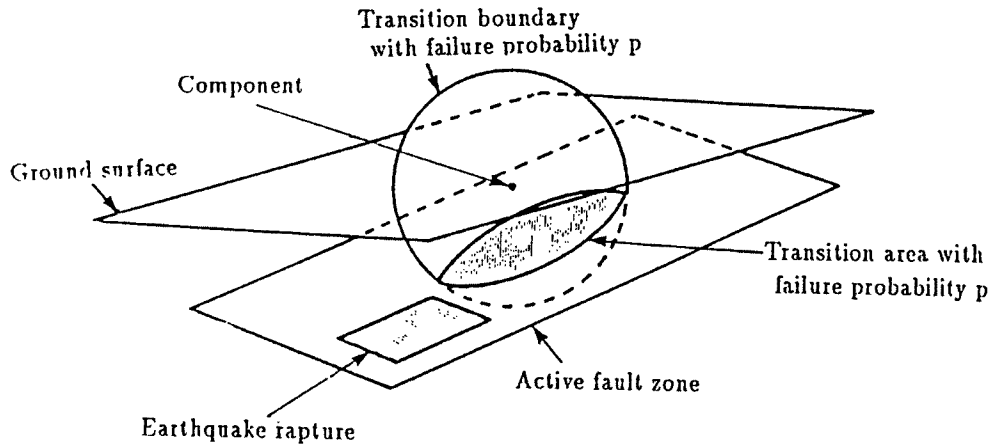


Fig. 2. Transition boundary, collocation of an earthquake rupture in the active fault zone and transition area of a component.

影響圏を作成するので、影響圏と潜在的断層発生域の交面である影響域は、離散化された破壊確率の数だけ発生するが、簡単のため破壊確率 p の影響域を1つだけとりだして考える。破壊確率 p の影響圏と潜在的断層発生域が交わる平面を破壊確率 p の影響域として、Fig. 2 にこれらの関係を図示する。

また、地震断層を二次元的な広がりを持つと考えるよりも、その中心で地震断層の位置を表現した座標系を用いた方が解析が簡単となることから、座標変換を行う。ノードの場合、修正前の影響域を中心で4象限に分離し、それぞれ地震断層の長さ、幅の半分ずつ移動し、直線で結んだものである。また潜在的断層発生域も、発生する地震断層の長さ、幅の半分ずつ狭めたものとなる¹⁾。座標変換後の影響域を、以後影響域と定義する。

ライフラインシステムの信頼性評価は、ネットワークの特性や信頼性評価の目的により様々な定義がなされる。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。

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 、信頼性指標を I_i とすれば信頼度 $R(G|M)$ は次式のように表現できる。

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

ここで、信頼性指標 I_i の求め方を Fig. 3 に従って述べていく。Fig. 3 の様な簡単なネットワークがあり、信頼性基準をノード1と4の連結性とする。今、ノード2に破壊確率0.5の影響域、ノード3に破壊確

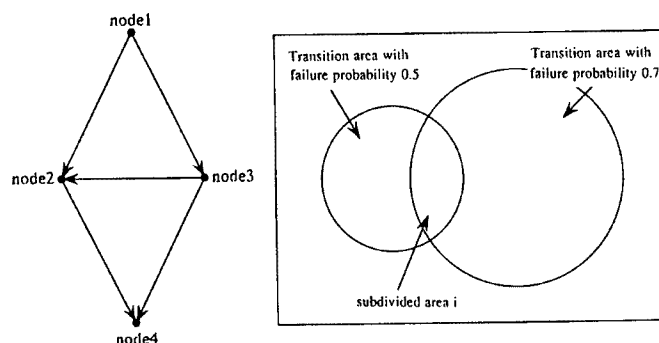


Fig. 3. Example of the collocation of transition area with different failure probability for a simple network. (The nodes 2 and 3 fail with probability 0.5 and 0.7).

率0.7の影響域がある場合を想定し、小領域 i の信頼性指標を求めてみる。信頼性指標 I_i とは小領域 i で断層が生じても信頼性基準をみたす確率で、この場合ノード2か3のどちらか1つでも非破壊なら満たされるので、 $I_i = 1 - 0.5 \times 0.7 = 0.65$ と求まる。

3. 地震時信頼性解析へのファジィ理論の適用

各種の不確定性を確率論ではなくファジィ理論を用いて表現すれば、構成要素の破壊確率は100%のまま影響距離の境界があいまいになるので、ネットワークの地震時における信頼性がファジィ化される。本節では、まず簡単に基本となるファジィ演算について説明した後、具体的に不確定性のファジィ化を行う。

3.1 ファジィ集合と演算

ファジィ集合は個々の要素がその集合に属するか属さないかが明確に規定されておらず、Fig. 4 のように境界がぼやけている。そこで帰属度つまり個々の要素がその集合に属する度合いというものを設定する。その集合に対し要素と帰属度の間の関係を帰属度関数と呼ぶ。帰属度は0と1の間の数として数量化され

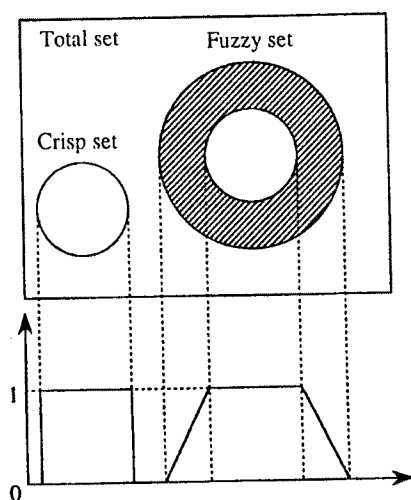


Fig. 4. Fuzzy set and membership function.

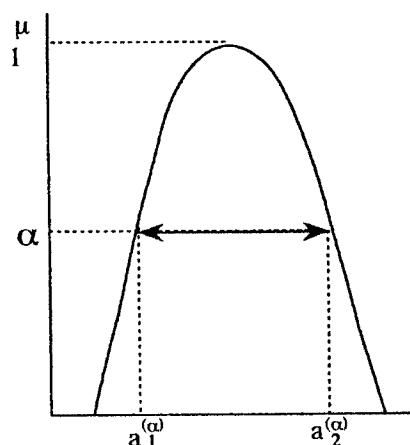


Fig. 5. A fuzzy number and the level of pre-sumption α .

る。集合に属する場合は帰属度が1, 属さなければ0で, 境界など属しているか属していないか不明瞭な場合0と1の間の値をとる。

ファジィ理論を現実問題に適用するに当たっての最大の課題は帰属度関数の合理的な決定法が確率されていないことである。通常用いる二等辺三角形帰属度関数の場合, 強いて客観性を求めるのならば, 実験値や統計値と対応させるため, たとえば, 平均値を頂点に対応させ, 両裾を標準偏差や信頼区間を選ぶことが考えられ, 本解析でもこの考え方にしたがって帰属度関数の決定を行った。

あるファジィ数を A としてその帰属度関数を μ_A とする (Fig. 5)。いまファジィ数 A の α レベル集合とは

$$A_\alpha = [a_1^{(\alpha)}, a_2^{(\alpha)}] \dots\dots\dots (5)$$

というある区間で表されるクリスプ集合である⁴⁾。この α レベル集合とファジィ数 A は分解原理によって結びつけられる。ファジィ数 B の α レベル集合を

$$B_\alpha = [b_1^{(\alpha)}, b_2^{(\alpha)}] \dots\dots\dots (6)$$

とするとファジィ数 A とファジィ数 B の四則演算は次のようになる。

$$A_\alpha + B_\alpha = [a_1^{(\alpha)} + b_1^{(\alpha)}, a_2^{(\alpha)} + b_2^{(\alpha)}] \dots\dots\dots (7)$$

$$A_\alpha - B_\alpha = [a_1^{(\alpha)} - b_2^{(\alpha)}, a_2^{(\alpha)} - b_1^{(\alpha)}] \dots\dots\dots (8)$$

$$A_\alpha \times B_\alpha = [a_1^{(\alpha)} \times b_1^{(\alpha)}, a_2^{(\alpha)} \times b_2^{(\alpha)}] \dots\dots\dots (9)$$

$$A_\alpha / B_\alpha = [a_1^{(\alpha)} / b_2^{(\alpha)}, a_2^{(\alpha)} / b_1^{(\alpha)}] \dots\dots\dots (10)$$

これを分解原理を用いてファジィ数 $C = A (*) B$ に復元しファジィ数 C が定義できる。

3.2 影響距離のファジィ化

ここでは, 埋設管のひずみの計算式(1)に現れる地盤の固有周期 T , 最大加速度 a がファジィ数で表現できるとし, 影響距離をファジィ化する。そこで本節では経験式の曖昧さを考え, 結果として影響距離が曖昧になると考える。

(1) 地盤の固有周期をファジィ化した場合

表層地盤のせん断弾性波速度 $\bar{V}_s$ は, 標準貫入試験の N 値から, 経験式によって推定している。せん断弾性波速度の推定値 $\bar{V}_s$ と実測値 V_s の関係についての研究結果⁵⁾によると, 推定値 $\bar{V}_s$ と実測値 V_s の比の対数は正規分布に近い形状で頻度分布しており, 実測値 V_s は推定値 $\bar{V}_s$ の $\frac{1}{2}$ から2倍の範囲にばらつくことが報告されている。そこで, $\log \frac{V_s}{\bar{V}_s}$ が平均値 $\mu_{V_s} = 0$ となる正規分布に従うとし, 推定値 $\bar{V}_s$ の2倍が $2\sigma_{V_s}$ になるとして, 標準偏差 σ_{V_s} を求めると, $\sigma_{V_s} = 0.151$ となる。つまり $\log \frac{V_s}{\bar{V}_s}$ は $N(\mu_{V_s}, \sigma_{V_s}^2)$ の正規分布に従うとする。そこで推定値より $b\sigma_{V_s}$ ばらついた値は, $\tilde{V}_s = 10^{b\sigma_{V_s}} \bar{V}_s$ で与えられる。今 $b = 1$ とするとせん断弾性波速度の帰属度関数の α レベル集合は

$$[10^{-(1-\alpha)\sigma_{V_s}} \bar{V}_s, 10^{(1-\alpha)\sigma_{V_s}} \bar{V}_s]$$

で与えられる。

固有周期は

$$T = \frac{4H}{\bar{V}_s} \dots\dots\dots (11)$$

と表されるから, 地盤の固有周期 T の α レベル集合は

$$[10^{-(1-\alpha)\sigma_{V_s}} T, 10^{(1-\alpha)\sigma_{V_s}} T]$$

となる。Fig. 6 にその一例を示す。これは後述するガス管網のノード385地点での地盤の固有周期をファジィ数で表現したものである。

ガス指針で T 字管に発生する地震時ひずみを算出する際に用いている設計震度かわりに震度 $K = \frac{a}{g}$ を用い, それに建設省土木研究所が提案している最大加速度距離減衰式

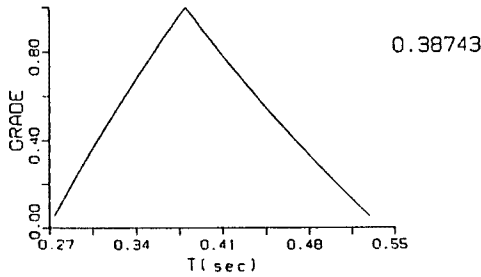


Fig. 6. A fuzzy membership function for natural period of ground at node 385 (Earthquake magnitude: 7.4).

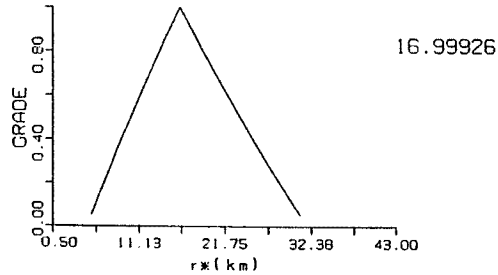


Fig. 7. Calculated fuzzy membership function of transition distance using the fuzzy membership function given in Fig. 6.

$$a = 227.3 \cdot 10^{0.308M} \cdot (r + 30)^{-1.201} \dots\dots\dots (12)$$

を代入し、構成要素から断層までの距離と地震時ひずみの関係式を得る。そして構成要素の地震時ひずみに、破壊に対する許容ひずみを代入して求まる影響距離 r_0 は次式で与えられる。

$$r_0 = \left(\frac{\varepsilon^* g}{227.3 \cdot 10^{0.308M} \frac{2}{\pi^2} \beta (1 - \alpha^*) TS_v \cos \frac{\pi z}{2H}} \right)^{-\frac{1}{1.201}} - 30 \dots\dots\dots (13)$$

ここで

ε^* : 構成要素の破壊に対する許容ひずみ

M : マグニチュード

β : 変換係数

α^* : 滑りを考慮した変位伝達係数

S_v : 単位震度当りの応答速度 (cm/sec)

T : 表層地盤の固有周期 (sec)

z : 導管の埋設深さ (m)

H : 表層地盤の厚さ (m)

である。上式にファジィ化された固有周期を代入しファジィ演算を行い、影響距離の帰属度関数が決定できる。Fig. 7 にその1例を示す。

(2) 最大加速度距離減衰式をファジィ化した場合

実測の最大加速度 a は、各種不確定要因があるので、推定値 $\bar{a}$ のまわりでばらつくと考えられる。実測のデータを用いると $\log \frac{a}{\bar{a}}$ は平均値 $\mu_a = 0$ 、標準偏差 $\sigma_a = 0.224$ の正規分布になるので、推定値より $b\sigma_a$ 離れた値は式(12)より

$$a = 227.3 \cdot 10^{0.308M + b\sigma_a} \cdot (r + 30)^{-1.201} \dots\dots\dots (14)$$

と表される。今 $b=1$ を基準として最大加速度 $\bar{a}$ の α レベル集合を

$$[10^{-(1-\alpha)\sigma_a} \bar{a}, 10^{(1-\alpha)\sigma_a} \bar{a}]$$

と定義すると、影響距離の α レベル集合は Fig. 8 に示すように、推定値 $\bar{a}$ から $-(1-\alpha)\sigma_a$ と $(1-\alpha)\sigma_a$ だけ離れた距離減衰式と $a = \bar{a}$ との交点から決定され

$$[(r_0 + 30) 10^{-\frac{(1-\alpha)\sigma_a}{1.201}} - 30, (r_0 + 30) 10^{\frac{(1-\alpha)\sigma_a}{1.201}} - 30]$$

のように与えられる。ノード385における影響距離をファジィ数で表現したときの帰属度関数を Fig. 9 に示す。

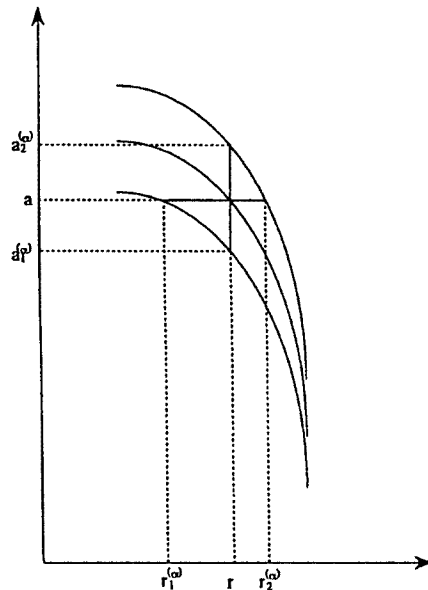


Fig. 8. Schematic presentation to calculate the α -level transition distance.

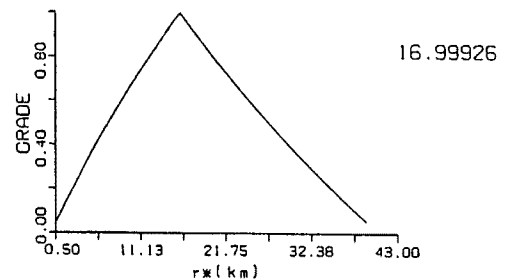


Fig. 9. Calculated fuzzy membership function of transition distance at node 385 using fuzzy membership function of acceleration for earthquake magnitude of 7.4.

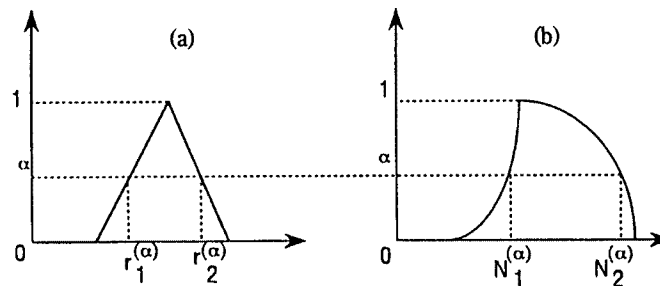


Fig. 10. Relationship between fuzzy membership function of transition distance and that of evaluation points.

3.3 信頼性の計算法

まず、影響距離の中で地震断層が発生すれば構成要素は100%破壊すると仮定する。各構成要素が100%の確率で破壊する影響距離 r を算出し、その距離をファジィ化し曖昧な影響距離 $\tilde{r}$ を定義する。ここで曖昧な影響距離 $\tilde{r}$ は $r_{\min}$ から $r_{\max}$ までの幅を持つ値となる。Fig. 10(a) に影響距離の帰属度関数を示す。

一方、ネットワークの信頼度は次式で求められる。

$$R = \left\{ \sum_{r=1}^N I_r \cdot N_r \right\} / \left\{ \sum_{r=1}^N N_r \right\} \dots \dots \dots (15)$$

ここに、 N_i は小領域 i の評価点数で近似的に面積の変わりとなる。 I_i は潜在的断層発生域上に一様に分布させた評価点のうち小領域 i に含まれる信頼性指標であった。影響距離にファジィ性を与えることによって作成された影響域もその境界があいまいになるので、曖昧な小領域が発生することになる。いま、影響距離に α レベルを設定すれば、Fig. 10(a) に示すような2つの影響距離 $r_1^{(\alpha)}$ と $r_2^{(\alpha)}$ が全ての構成要素に対して定義できるのでまず、 $r_1^{(\alpha)}$ のみもちいて、Fig. 10(b) に示すような $N_1^{(\alpha)}$ を計算し、それを式(15)に代入

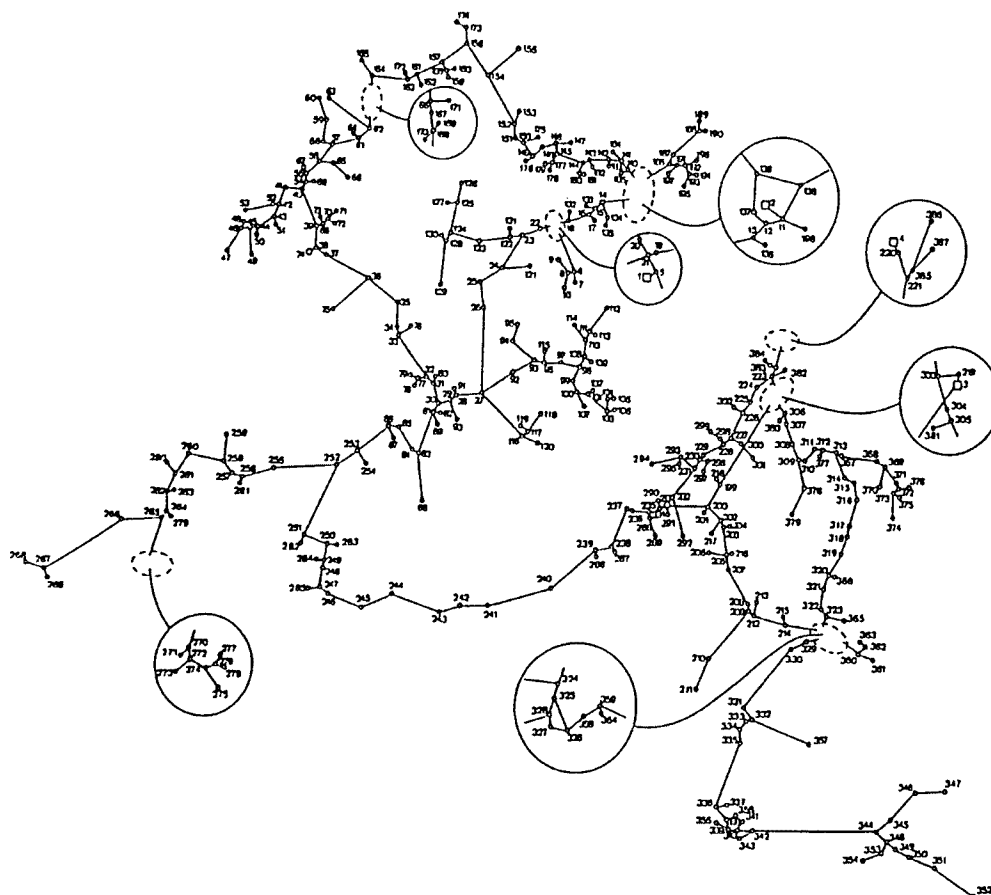


Fig. 11. Gas distribution system in the Shonan Area.

しネットワークの信頼性を計算し、それを $R_1^{(\alpha)}$ とする。つぎに、 $r_2^{(\alpha)}$ のみを用いてネットワークの信頼性を計算しそれを $R_2^{(\alpha)}$ とすることによって信頼性の α レベルが定義できる。Fig. 10(b) に示した α レベルの評価点 $\tilde{N}_r = [N_1^{(\alpha)}, N_2^{(\alpha)}]$ 用いれば、信頼度 R の α レベル集合 $\tilde{R} = [R_1^{(\alpha)}, R_2^{(\alpha)}]$ は次式で与えられる。

$$\tilde{R} = \left\{ \sum_{r=1}^N I_r \cdot \tilde{N}_r \right\} / \left\{ \sum_{r=1}^N N_r \right\} \dots\dots\dots (16)$$

3.4 大規模ガス管網への適用

本節では湘南地区の中圧導管網のうち、特にガスの圧力が3~10 kgf/cm² である中圧A導管網に、本研究の地震時信頼性評価手法を適用する。これは387個のノードと391個のリンクからなるネットワークである。

そして、リンクは一方通行であり、その両端のノードのうちノード番号の小さい方が上流側である。また供給点は4点あり、これは高压導管からこの湘南地区Kブロック内の中圧導管への接続点である。具体的なネットワークの形状は Fig. 11 で、対象とした潜在的断層発生域は Fig. 12 に示した。信頼度の評価基準は

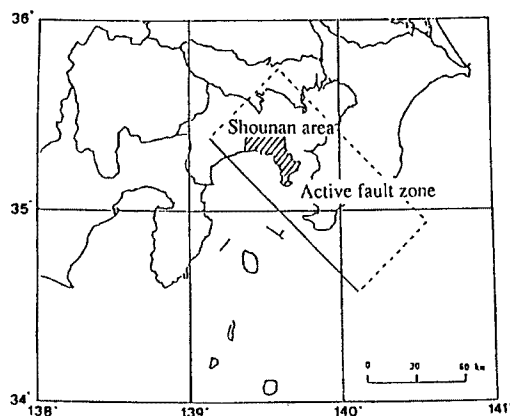
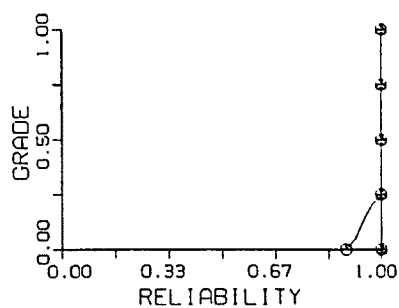
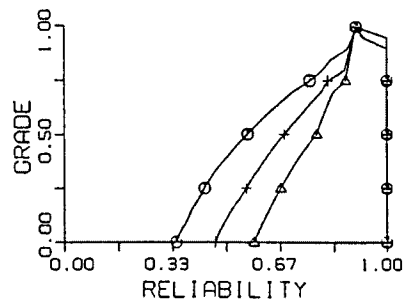


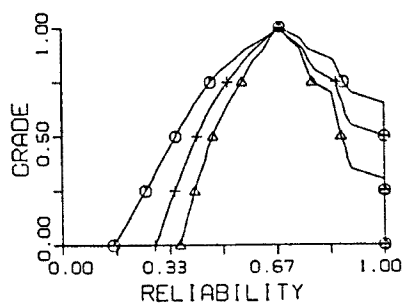
Fig. 12. Active fault zone.



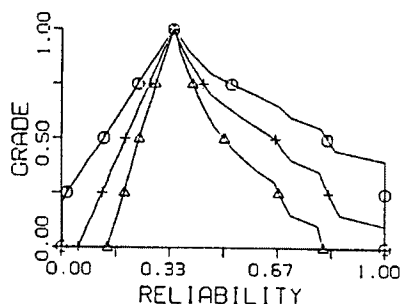
(magnitude 6.6)



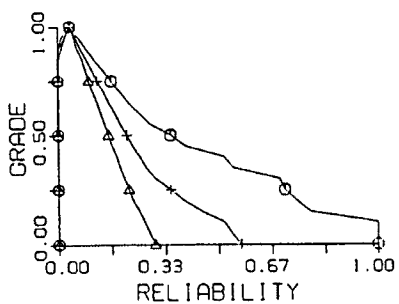
(magnitude 7.2)



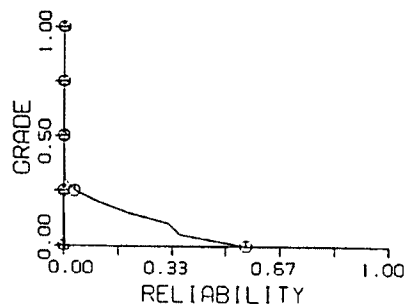
(magnitude 7.4)



(magnitude 7.6)



(magnitude 7.8)



(magnitude 8.0)

- acceleration
- △ response velocity value per unit seismic coefficient
- + natural period of ground

Fig. 13. Fuzzy membership function of network reliability for earthquakes with magnitude 6.6, 7.2, 7.4, 7.8 and 8.0 taking into account uncertainties of attenuation law, response velocity value per unit seismic coefficient and natural period of ground.

4つの供給点から末端の147個のノードへ連結できることとした。

最大加速度距離減衰式と固有周期を個別にファジィ化し、信頼度の帰属度関数を求めた結果が Fig. 13 に示されている。図から明らかなように、最大加速度のあいまいさの影響が最大となっていることが分かる。

4. 確率論とファジィ理論をとりいれた地震時信頼性解析

4.1 固有周期のファジィ化

不確定要因を確率的に取り扱うためには非常に多くの基礎データが必要になる。そこでデータ数の多いアテニュエーション則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場合は、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。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豊富な場所は、ボーリングデータが構成要素の近くにあるのでそれをネットワークの地震時信頼性解析に用いればよいが、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までの距離が大きくなった場合それ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の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、この距離より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、幅を持ったファジィ数を設定して、その情報を与えて解析する。表層地盤の固有周期 T の帰属度関数の与え方は3.2で述べた。

(2) ファジィレベル2

(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⁶⁾を用いて定める。本研究の解析対象地区は湘南地区であり、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るので、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—固有周期の関係をを用いて Fig. 14 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。また、「浅い」という帰属度関数を得たら帰属度が0になる表層厚の最大値を H_3 とする。解析対象地域のデータの中で最も浅い表層厚は0となるから、「浅い」地盤に対する固有周期の台形型帰属度関数が設定できる。

(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ので、地形（微地形）から N 値の範囲を与えてやり、その土質から経験式を用いてせん断波速度の範囲を求める。

Table. 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 値は土質毎に経験的に次のような関係がある⁷⁾。

$$\begin{array}{ll}
 \text{沖積粘土} & V_s = 102 N^{0.292} \\
 \text{沖積砂質土} & V_s = 80.6 N^{0.331} \\
 \text{洪積粘土} & V_s = 114 N^{0.294} \\
 \text{洪積砂質土} & V_s = 97.2 N^{0.333}
 \end{array} \quad (17)$$

上式と Table. 1 の N 値を用いて V_s の範囲が得られる。表層厚は平均表層厚 H_1 から最深表層厚 H_2 の間

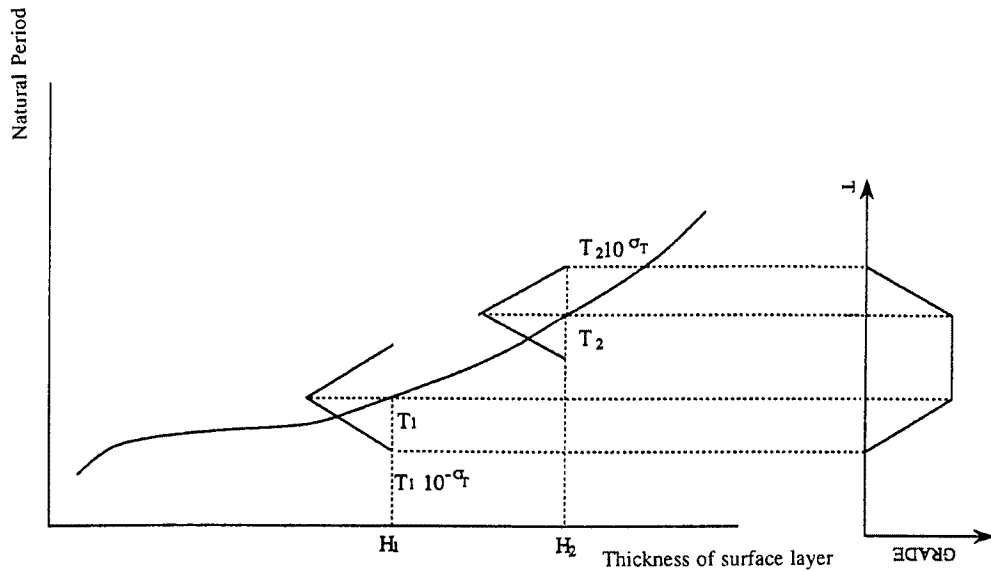


Fig. 14. Determination of fuzzy membership function of natural period for deep subsurface ground when being able to use enough boring data.

Table 1. General relationship between N values and geological as well as geomorphological classifications

地形	土質	N 値	良否
扇状地	粗大な砂れき	30以上	優良
自然堤防	砂質土	10～20	やや不良
後背湿地	粘土・シルト・細砂・PEAT	10以下	やや不良
三角州	細砂・粘土・厚い軟弱層	5以下	不良
土砂供給の多い河川沿岸	砂れき	20以上	良好
小オボレ谷跡	粘土・シルト・PEAT	5以下	極不良
海岸砂州	砂・砂れき	15以下	良好
潟湖跡	粘土・シルト・PEAT・細砂	5以下	不良

の値をとるとして、表層厚—固有周期の関係を用いて Fig. 15 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。

4.2 信頼度のファジィ化

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 (Fig. 16(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。

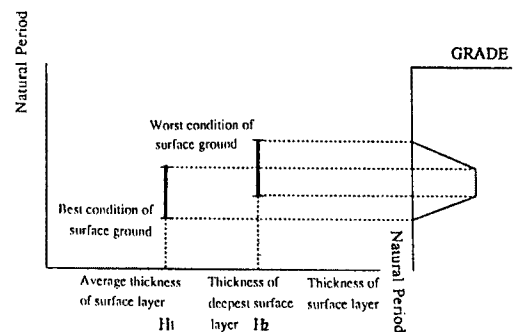
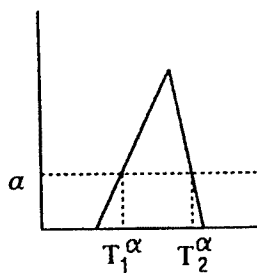
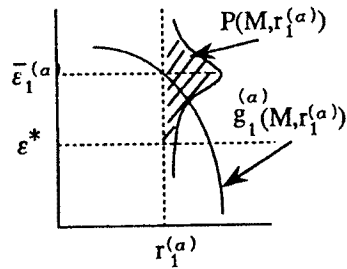


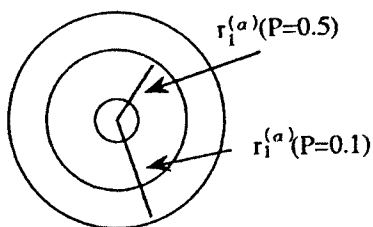
Fig. 15. Determination of fuzzy membership function of natural period using geological and geomorphological data.



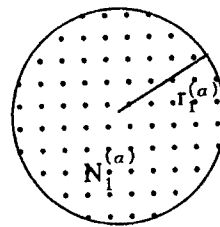
(a) Fuzzy membership function of natural period of ground.



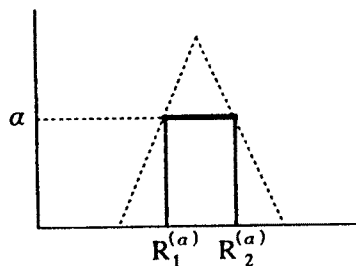
(b) Failure probability of a component for α -level transition distance.



(c) Discretization of α -level transition distance for several failure probabilities P of a component.



(d) α -level transition area and distribution of evaluation points.



(e) Construction of fuzzy membership function of network reliability.

Fig. 16. Determination of fuzzy membership function of network reliability when taking into account both of the fuzzy uncertainty of natural period and probabilistic uncertainty of attenuation law of acceleration.

α レベルの固有周期 T_1^α が決まると、式 (1) より α レベルの地盤条件下の地震時ひずみの推定値 $\bar{\epsilon}_1^{(\alpha)}$ が

$$\bar{\epsilon}_1^{(\alpha)} = f_1^{(\alpha)}(r, M) \dots \dots \dots (18)$$

と表される。ここで、 α レベルの地震時ひずみ $\epsilon_1^{(\alpha)}$ はその推定値 $\bar{\epsilon}_1^{(\alpha)}$ のまわりでばらつく。 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 Fig. 16 (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

$$p(M, r_1^{(\alpha)}) = P(\varepsilon_1^{(\alpha)} \geq \varepsilon^*) \dots \dots \dots (19)$$

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るので、距離－破壊確率の関係式が構成できる。これで α レベルにおける、破壊確率 p をもつ影響距離 $r_1^{(\alpha)}$ が求められる (Fig. 16(c))。さて、 α レベルの影響距離が定まると、 α レベルの影響圏そして影響域が定まる。よって影響域内に含まれる評価点数も定まる (Fig. 16(d))。これを α レベルの評価点数 $N_1^{(\alpha)}$ とする。また、影響域の交わりにより作成された小領域も決まり、その小領域の信頼性指標が定まる。これを α レベルの信頼性指標とする。いま、信頼度は式(4)で与えられるので、 α レベルの信頼度は

$$R_1^{(\alpha)} = \frac{\sum I_{1i}^{(\alpha)} N_{1i}^{(\alpha)}}{\sum N_{1i}^{(\alpha)}} \dots \dots \dots (20)$$

で与えられる。

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 Fig. 16(e) のように信頼度 R の帰属度関数が求まる。

4.3 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 Fig. 14 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、東京ガス導管系統図、そして軟弱地盤ハンドブック⁸⁾ を利用した。

信頼性解析で設定した地震のマグニチュードは6.4から8.0まで0.2刻みの9通りである。

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 Fig. 17 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て全て「深い」として解析を行った。信頼性の評価基準は4 個の供給点と147個の需要点間の連結性とした。

確率論のみの解析法で得た信頼度 (i), (ii) の両解析法で得た信頼度を比較したものを Fig. 18(a), (b) に示す。従来の手法では地盤条件の不確実性は考慮せず一番近いボーリングデータを利用しデータをクリスプ数で与えたので信頼度はクリスプ数でその帰属度関数はひろがりを持たない。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1.0 km, 0.75 km, 0.5 km である場合の信頼度の帰属度関数を比較したものを Fig. 19(a), (b) に示す。不確定基準距離が大きいほど、つまりファジィレベル2にする基準が甘いほど信頼度の帰属度関数の頂点の値は大きい。さて両手法の解析結果の比較を Fig. 20(a), (b), (c), (d) に示す。マグニチュードが小さいとファジィレベル2に属する構成要素に影響がきいてくるので、そのファジィ化手法による差異がはっきりとわかる。マグニチュードが大きくなるにつれて、ファジィレベル1に属する要素の影響がきいてくる。ファジィレベル1では手法間の差異はなく、帰属度関数としては同様な形となっている。不確定基準が1 km の場合にはファジィレベル2のノードが少なく手法間の差異が少ない。結果的に (i) の手法で求めた信頼度の帰属度関数と (ii) で求めたものとは信頼度がフラットになる幅にそれほど差異が認められなかった。つまりボーリングデータが少ない場合でも本章の手法を用いればボーリングデータの多い場合とあまり精度の違わない解析ができることがわかる。

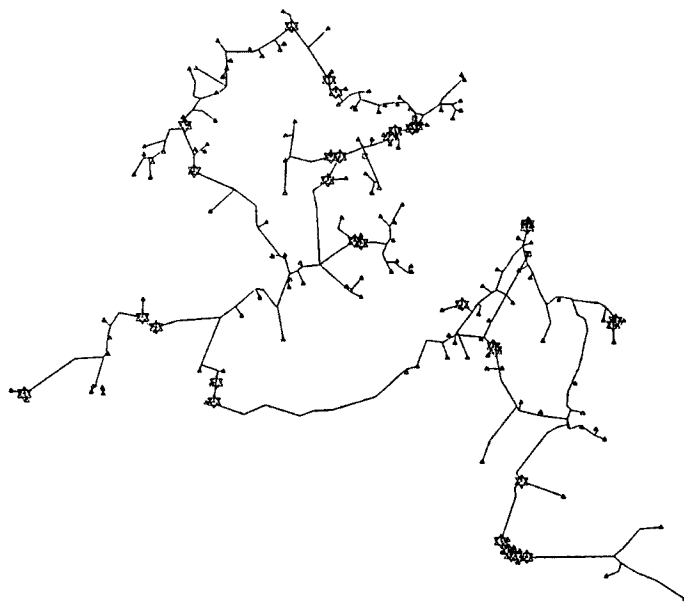


Fig. 17. Distribution of nodes with second fuzzy level uncertainty.

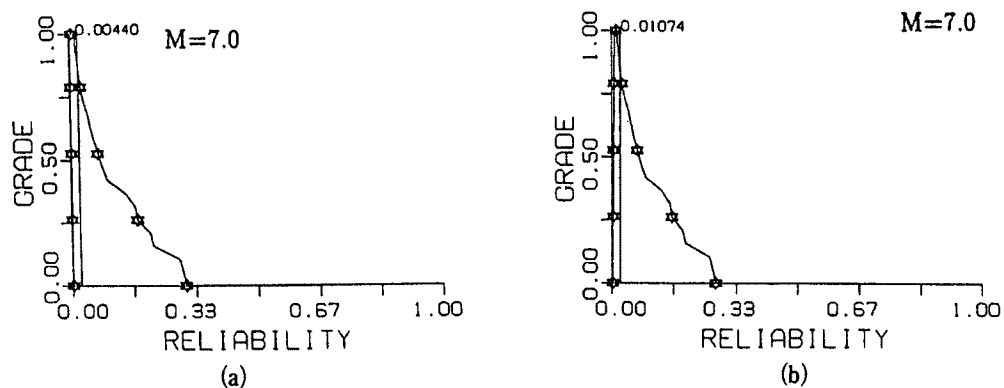


Fig. 18. Fuzzy membership function of network reliability for earthquake magnitude 7.0: (a) for the case of being able to use enough boring data, (b) for the case of being able to use only geological and geomorphological data.

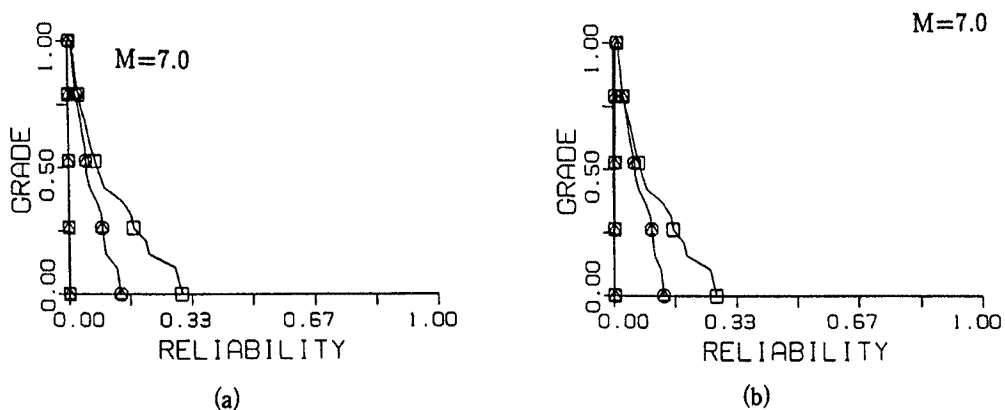


Fig. 19. Comparison of network reliabilities calculated by using three different selection index for boring data: (a) for the case of being able to use enough boring data, (b) for the case of without boring data.

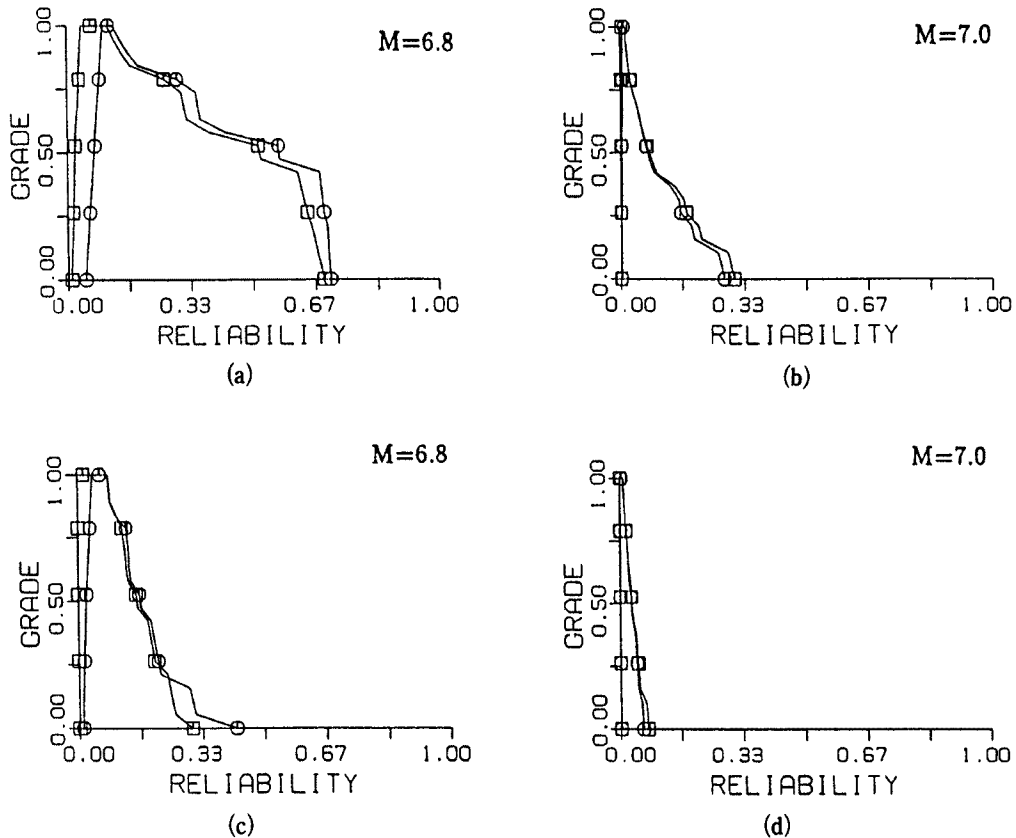


Fig. 20. Comparison of network reliabilities: (a) selection index = 1 km, (b) selection index = 0.5 km.

5. 結 論

本研究で得られた成果を次に挙げる。

1. 全ての構成要素についてファジィ理論で処理する地震時信頼性解析を行うプログラムを開発した。
2. 上のプログラムを東京ガス(株)の湘南地区の中圧A導管ネットワークに適用した結果、地震動のアテニュエーション則による曖昧さの影響が大きいことがわかった。
3. 不確定要因を確率論とファジィ理論で処理し、地震時信頼性解析を行うプログラムを開発した。この時地盤情報が不確定になる基準の距離を設定し、構成要素とボーリングポイントの距離がその基準の距離よりも小さい場合はボーリングデータをそのまま使い、大きい場合は (i) ボーリングデータが多ければ表層厚と固有周期のファジィモデルを作成し、(ii) 少なければ地形情報より固有周期の帰属度関数を設定し、ファジィ理論を導入した。
4. 上の (i), (ii) 両手法を同じく東京ガス(株)の湘南地区の中圧A導管ネットワークに適用した結果、両手法においてそれほど差異はなく、ボーリングデータ数が少ない場合でも微地形からの情報により精度の良い解析が行えることがわかった。

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, Vol. 16, No. 2, pp. 51-72, 1982.
- 2) 日本瓦斯協会：ガス導管耐震設計指針，1982年
- 3) 川島一彦・相沢 興・高橋和之：最大地震動及び地震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
- 4) Arnold Kaufmann ・ Madan M. Gupta: Introduction To Fuzzy Arithmetic, Van Nostrand Reinhold Company, pp. 1-35.
- 5) 東畑郁生・Stephane Ronteix: N 値から推定した V_s の誤差が地震応答解析に及ぼす影響，第23回土質工学研究発表会概要集，pp. 825-828, 昭和63年 6 月
- 6) 菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業，pp. 137-156, 1989年 7 月20日
- 7) 土木学会編：地震動・動的物性，技報堂，pp. 92, 1989年12月 5 日
- 8) 最新軟弱地盤ハンドブック編集委員会：土木・建築技術者のための最新軟弱地盤ハンドブック，建設産業調査会，pp. 20