

# 地中ライフラインの耐震診断 エキスパートシステム

高田至郎\*・孫 建生\*\*・大久保高志\*\*\*  
・小川安雄\*\*\*\*

本論文は既存地中管路の耐震安全性を検討する目的で構築されたエキスパートシステムとその応用例について述べている。あいまいな地盤情報をファジィ理論を用いて定量化し、さらに人工知能言語 OPS83 と FORTRAN をリンクして管路の三次元地震応答解析をシステムの内部で実行して、その結果を診断に取り入れることを可能としている。診断の精度と能率を高めるために、管路情報のデータベース化を行い、グラフィック機能などを備えている。

**Keywords :** lifeline, expert system, fuzzy, OPS83, liquefaction

## 1. はじめに

今日の都市生活では、ライフライン系の施設に依存するところが多くなっており、地震の襲来によりこれらのシステムに同時にかつ多数の被害が発生すれば、都市機能の麻ひは免れないであろう。1964年の新潟地震・1978年の宮城沖地震・1983年の日本海中部地震時に、ライフライン施設に多くの被害が発生し、また、1989年10月17日のロマ・ブリータ地震 ( $M=7.1$ ) によるライフライン施設被害の記憶が新しい。既存ライフライン施設の耐震性診断は重要な地震防災上の課題である。

耐震診断には施設や地盤に関する限られたデータのもとで、発生し得る挙動を予測し、それぞれの挙動下での安全性を診断しなくてはならない。したがって、ライフラインの診断結果は診断者のあいまいな情報に対する主観判断および診断者が使用する予測方法によって左右される場合が多い。

一方、ライフライン施設は、都市の至るところに平面的に敷設されており、施設のすべてについて診断を行うことは、膨大な時間と人力、および専門的な知識をもつ技術者が必要となってくる。これら一連の診断作業を客観度が高く、短時間に、かつ最小の人力で、しかも必ずしも専門家ではない人によって行うためにはエキスパート・システムに代表される知識工学的手法の採用が有望となる。

エキスパート・システムはある分野における特有な知識を経験則として IF~THEN 形などのルールで表現し、それらをさまざまな状況に適用して、問題解決の結

論を与えるものである。1970年半ばから特に医学分野でのシステムの開発が盛んとなり<sup>1)</sup>、構造工学分野では初めてのエキスパートシステムとして建築物の被害査定エキスパート・システム SPERIL が K. S. Fu らによって構築されている<sup>2)</sup>。最近になって、土木分野では構造物の外力、材料性質などの特徴に応じて、種々のエキスパート・システムが構築されている<sup>3)</sup>。一方、ライフラインの耐震診断にかかわる研究分野として、地震の発生から波の伝播、地盤の応答(震動、変状など)、ライフライン施設の挙動、耐震設計まで、従来、かなりの知見が得られている。ライフラインの耐震診断はこれらの知見をもとに実行される。しかし、これらの知見はエキスパートの経験則だけでは表現できなく、構成情報を積極的に利用する深い知識を使用する必要がある。すなわち、数値演算もその一例である。したがって、経験則に基づく論理判断・データベース機能のほかに演算機能をもつ診断システムが望ましい。

数値演算機能をもつエキスパート・システムの例として中村ら<sup>4),5)</sup>が水力鋼構造物の寿命予測システムを構築している。数値演算機能としては、ダムゲートの簡易構造解析システムを導入している。最初に、データベース/簡易解析システムからダムゲートの状態などの定性的知識と、測定値、解析値などの定量的知識を取り込む。次に、それを推論処理に適したフレーム形式に変換した後、専門家の経験的知識と組み合わせながら、推論処理を行っている。ライフラインの耐震診断エキスパートシステムの構築では、地震発生-基盤加速度-地盤特性・応答-管路応答の多重解析を必要とし、各段階での解析に必要な入力情報が不足あるいはあいまいさを含んでいる場合が多く、入力情報、データベース、数値解析、ルールによる判断を有機的に結び付ける必要がある。

本論文はこのような観点から二次元的に広がっているガス管路システムの耐震性を診断する目的で、構築ツー

\* 正会員 工博 神戸大学助教授 工学部土木工学科  
(〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1)

\*\* 学生会員 学術博士 神戸大学大学院自然科学研究科

\*\*\* 正会員 工修 長谷川コーポレーション大阪エンジニアリング部

\*\*\*\* 正会員 大阪ガス(株) 供給技術センター

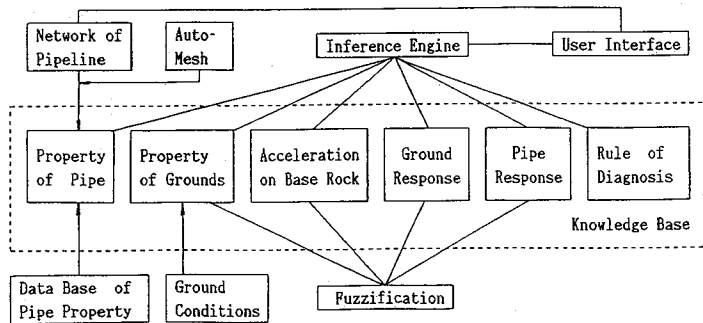


Fig.1 Functional Frame of Expert System.

Rule Pipe-Data13

```
{
  &1 (Class.: Cast Iron, Liner)
  &2 (Common Diameter:200mm)

  Outer Diameter=220mm, Thickness=9.5mm,
  Length=5m, E=2.0×105Kg/cm2,
  Max Displac. of Joint=57mm, γ=0.43Kg/m,
  Max Angle of Rotation=0.206Radian
};
```

Fig.2 Example of Data Base for Pipe.

ル OPS83<sup>6)</sup> を用い、OPS83 言語と C、FORTRAN 言語とのリンクによって、演算機能を有するエキスパートシステムの構築を行った。

## 2. 構築ツール OPS83 について

OPS83 は、ルールベースのプログラミング言語であり、カーネギーメロン大学で開発された OPS 系言語の最新バージョンで、OPS83 には C や FORTRAN などの他言語のリンク機能が搭載され、既存に開発された手続き型プログラムを利用し、システムに演算機能およびグラフィック機能を提供できる。本研究は OPS83 ツールを、UNIX WORKSTATION SONY NEWS 上で稼働させ、エキスパートシステムの構築にあたった。

## 3. システムの機能構成

システムの機能構成は、Fig.1 に示している。まず、診断対象地域の想定基盤加速度を算定する。次に、ネットワーク状の管路を自動的に診断単位に分割し、診断単位ごとにデータベースから材料特性を与え、入力情報を利用して、地盤特性・応答を求め、さらに、地中管路地震応答解析によって管路の応答を求め、安全性の基準に従って管路の診断を行う。また、システムに提供されたインターフェースが使用性の向上を図っている。さらに、地震の発生情報、地盤情報のあいまい性と、地盤応答、管路応答計算の不確定性を考慮して、知識ベースの利用にはファジィ理論を使用している。

おのおのの生成および機能は次のとおりである。

### (1) システムのインターフェース

OPS83 言語・C 言語およびそれらのリンクによってシステムに提供しているインターフェースは次のとおりである。

a) デジタイザーによる管路座標入力 ネットワーク状の管路座標入力作業をできるだけ省略する目的から、デジタイザーを用いてパイプラインのマップより直接座標を読み取る。各診断対象ラインの始点・終点座標、異形部 (T 字部、曲げ部、構造物との接合部、

レジュースーなど) の座標を読み取り、データファイル化する。

b) ドキュメンテーション 対象ライフラインの診断結果を第 3 者に報告するには、ユーザー自身が報告書を作成しなくてはならない。ユーザーの作業量を軽減するために、システムには診断結果報告書を自動的に作成する機能を搭載した。すなわち、診断が終了した時点で診断システムの紹介、診断方法、診断単位ごとの管路・地盤の入力情報、管路・地盤の特性値、数値解析結果、そして診断結果を表示した報告書がファイルの形に作成され、プリンターを介して日本語の文書として外部へ抽出できる。

c) グラフィック機能 ユーザーが与えた情報を視覚的に把握する目的で搭載された機能であり、ハードに内蔵されているグラフィックインターフェースを用いて、システムの実行時に、診断している診断単位の位置、中間結果、帰属度関数、管路ネットワークの危険場所等も同時に表示できる。

### (2) 管路特性

管路特性は次の 2 項よりデータベース化される。

a) ラインの平面座標特性 管路座標データファイルを利用し、システムは診断対象のライン上の異形部について両端 30 m、直管部について 50~100 m の間で自動的に診断単位に分割し、ラインに平面特性座標データファイルを形成する。

b) 管路特性データベース ガス管路 (直管部、T 字部、曲げ部、レジュースーなど) の材料、寸法、強度特性、継手特性などをあらかじめルールの形でデータベースに格納しておいて、診断時にユーザーが管種と外径を選択することによってルールがマッチし、対象管路特性が抽出される。Fig.2 はルール形の φ200 鑄鉄管のデータベースの例を示している。

管路の安全性の判断は管体のひずみ、継手の伸縮量、回転角を基準としている。

### (3) 地盤情報

前述したように、地中パイプラインの地震時挙動は取

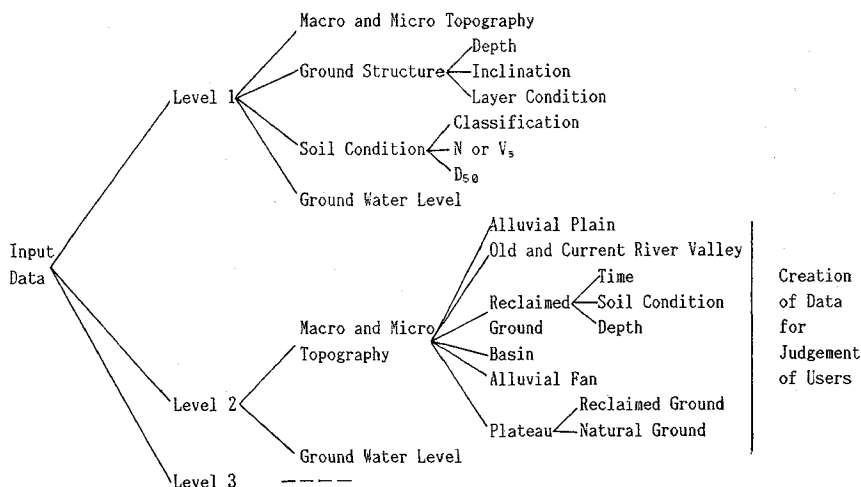


Fig.3 Frame of Input Data for Geological Ground Conditions.

Table 1 Upper and Lower Limit Values for Membership Functions.

Topography	Period (S)		Settlement (m)		Lcr
	$T_{min}$	$T_{max}$	$\delta_{1max}$	$\delta_{2max}$	
Alluvial Plain	0.40	1.00	0.80	0.15	0.50
River Valley	0.50	1.20	1.20	0.25	0.40
Reclaimed Ground	0.50	1.20	1.50	0.30	0.65
Basin	0.25	0.90	0.60	0.10	0.60
Alluvial Fan	0.08	0.80	0	0.23	0.80
Plateau	0.05	0.80	0	0.15	0.80

Note: 1) Lcr is Lower Limit Value for Liquefaction  
 2)  $\delta_1$  is maximum settlement by liquefaction  
 $\delta_2$  is maximum settlement by soft soil

り巻かれている地盤の挙動に左右されるが、埋設地盤に関する詳細な資料が揃う場合は少ない。入手できる情報を有効に利用して診断の客観性を高めるために、地盤情報の入力内容を次の3種のレベルに分類する。

レベル1：埋設地点およびその周辺の地盤に関するボーリングデータ（土層構成、分類、N値）などがある。

レベル2：詳細資料がないが公表の表層地質図等がある。

レベル3：地盤に関する資料は、ほとんどない。

地盤の情報入力データのフレームの概要を Fig.3 に示している。従来の地震被害調査から管路の被害は地形条件との相関性が大きいことから、レベル2では入手しやすい地形条件を重点としている。また、これらの表層地質図から表層地盤の深さが読み取れるとしている。

(4) 地盤特性

地中ライフラインの地震応答にかかわる地盤特性は表層の地盤の卓越周期と波動伝播速度で表現される。地盤情報レベル1の場合には、各層のN値あるいはせん断

波速度を利用してガス導管耐震設計指針<sup>7)</sup>（以下、ガス指針と略す）によって算出され、地盤情報レベル2の場合には地形・微地形条件の入力に応じて、知識ベースが地盤特性値の範囲を与え、さらに、ファジィ理論<sup>8)</sup>に基づいて特性値の範囲内で三角関数形の帰属度関数を与えている<sup>9)</sup>。Table 1には、地形別の地盤周期限界値を示している。ただし、Table 1の  $T_{max}$  は沖積層の深さが30mの場合に相当し、他は線形の補間法で求めている。その補間法は、沖積平野、旧・現河道、埋立地の場合に平均せん断波速度を80m/s、他の場合に平均せん断波速度を120m/sとして  $T_{min}$  から算出した  $H_{min}$  と30mの間で行う。さらに、診断地点の地理位置、地形状況（たとえば：平野の広さ、平野での位置、川の流域の上流、下流、埋立地の境部など）および地盤の硬さなどに関するユーザーの主観判断によって、システムは知識ベースに基づいて帰属度関数を修正する<sup>9)</sup>。地盤情報レベル3の場合にはガス指針に従って最悪条件を設定し、後述の診断もガス指針に従う。

(5) 基盤加速度<sup>10)</sup>

基盤加速度はユーザーが一定値を入力する方法と地震危険度解析により推定する方法を選択することができる。システムには関西地域に11ゾーンの地震発生源を考慮しており、歴史地震の規模、位置をデータベース化している。地震危険度解析方法はユーザーが入力した再現期間、診断地点緯度・経度あるいは府県市に応じて、歴史地震データベースを利用して診断対象地点の基盤加速度を統計的手法より求めてくる。ここで、Seed<sup>11)</sup>のアテニュエーション式を採用し、地震発生回数  $n_m$  とマグニチュード  $m$  の関係には式(1)の Gutenberg・Richterの経験則を使用している。

$$\log_{10} n_m = a_1 - b_1 \cdot m \dots \dots \dots (1)$$

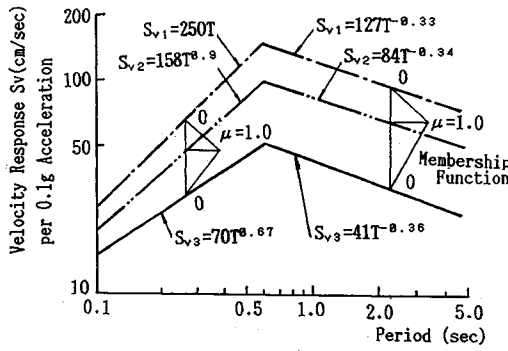


Fig.4 Fuzzy Velocity Spectrum.

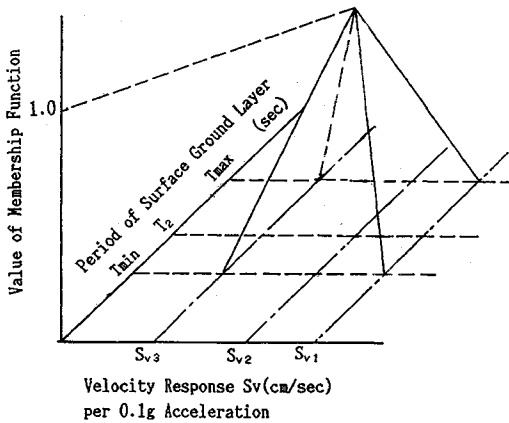


Fig.5 Membership Functions of Velocity Spectra.

この際、歴史地震の規模、震央を決定する過程の誤差<sup>12)</sup>を考慮して、歴史地震のマグニチュードの偏差を±0.25として次式のようにファジィ化した。

$$\mu = 1 - \frac{|m - m_0|}{0.25} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $m_0$ は歴史地震のマグニチュードであり、 $\mu$ は帰属度関数で、 $m_0$ を中心に三角形分布を仮定している。式(2)を式(1)に代入し、文献10)に従って再現期間内の基盤加速度を求めている。

(6) 地盤の地震応答

a) 管路位置の地盤の動的変位 地盤変位は地盤情報レベル1の場合には地盤特性値を用い、ガス指針に従って計算するが、情報レベル2の場合には地盤特性はファジィ数で、単位震度当たりの応答速度スペクトル $S_v$ はガス指針に与えられた実測値の上限・下限値を利用して、Fig.4のようにFuzzy化し、ユーザーが診断地点の地理位置、地盤の軟硬、被害の生じやすさなどの客観・主観の判断によって帰属度関数を修正し、ファジィ推論方法を用いてFig.5のようにスペクトル値( $S_v$ )・地盤変位およびその帰属度関数が求められる。ただし、Fig.5での帰属度関数は四角錐である。

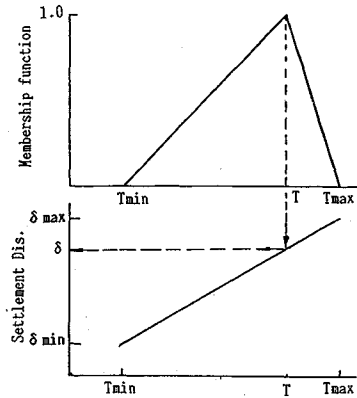


Fig.6 Calculated Settlement Displ. by Membership Function.

b) 地盤の液状化判別 地盤情報レベル1の場合には土質情報に従って岩崎・龍岡<sup>13)</sup>の方法と限界 $N$ 値法<sup>14)</sup>を用いているが、レベル2の場合には地形・微地形条件の入力とユーザーの判断による地盤条件の入力による地形分類および修正した地盤特性値の帰属度関数を用いて液状化判断を行う。この場合の判断基準は著者の経験によって提案し、さらに、いくつかの典型的な地盤に対して実施した液状化可能性判断と実際の液状化の有無の比較によって得られたのである。Table 1には地形条件に応じる限界値 $L_{cr}$ を示しており、次に定義している $L$ を利用して判別し、 $L > L_{cr}$ の場合には液状化地盤としている。

$$L = (T - T_{min}) / (T_{max} - T_{min}) \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $T$ の帰属度 $\mu$ が1.0である。

c) 地盤変位量 地盤情報レベル1の場合には地盤沈下量について著者ら<sup>15)</sup>の提案式を利用し、地盤の側方流動量は東畑<sup>16)</sup>の提案式を用いている。レベル2の場合には、地震調査資料に基づいて地形・微地形ごとの最大地盤変位量を定め、地盤特性値およびユーザーの入力によって修正した特性値の帰属度関数に応じて求めている。軟弱地盤亀裂幅は、実際のデータが少なく、ガス指針を参照して軟弱地盤の沈下量と同じ値を使用している。

レベル2の場合に設定した地盤変位量の上限・下限値をTable 1に示している。Fig.6は帰属度関数を用いて地盤変位量を計算した例で、帰属度関数と変位量の限界値を使用して、補間するものである。

(7) 管路の地震応答

管路特性、地盤特性値および地盤応答値を用いてOPS83言語とFORTRAN言語のリンクによって三次元非線形地震応答プログラム(ERAUL)<sup>17)</sup>を導入し、管路の応答値を計算する。設定の三次元計算モデルは、直管部と構造物際部の場合には文献18)と同じであるが、曲げ部とT字部の場合はTable 2に示している。地盤変位の境部と異形部の位置関係はERAULの解析

Table 2 3-Dimensional Analytical Model (Bend and T).

Input Ground Motion	Bend and T(dotted line)
Wave Propagation	
Crack	
Liquefaction	Uplift 
	Settlement 
	Lateral Flow 

Note : Model of settlement in soft soil deposits is same as the liquefaction model

結果から得た最悪条件と思われる条件を設定したが、変状可能な範囲と異形部位置の関係が知られば、システムの中で管路異形部に対して個別に診断する機能利用をして、地盤変状の境部と異形部の距離を設定すればよい。応答の解析結果の出力は、管体の最大ひずみ、応力、継手の最大伸縮量、回転角である。

(8) 診断用ルール

ルールは LHS 部(条件部)と RHS 部(実行部)によって構成している (Fig.2 を参照), LHS 部の全部の条件を満足すればルールがマッチし, RHS 部が実行される。診断用ルールは, データベースから管路特性値の検索, 地盤情報入力フレームの検索, 地盤特性値, 地盤応答, 管路応答計算のデータ作成およびこれらの計算のための FORTRAN 言語とのリンク, 管路応答値と許容値の比較を行うなどの役割を担当する。

(9) 推論機構

本システムは OPS83 言語の推論機構を使用している。

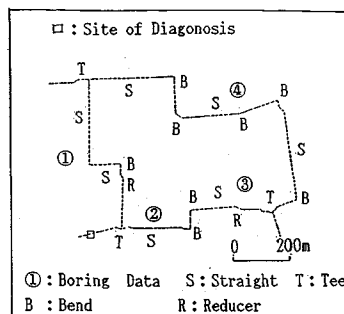


Fig.7 Gas Pipeline System Used for Diagnosis.

H (m)	①	N	D <sub>50</sub> (mm)	H (m)	②	N	D <sub>50</sub> (mm)
5	砂	10	0.50	5	シルト	10	0.06
10	砂	20	0.42	10	シルト	20	0.07
15			2.3	15	砂		2.48

Fig.8 Boring Data at sites ① and ②.

- Level 2
- Old and Current River Valley
- Alluvial Depth H=15.5m
- Ground Water Level W<sub>h</sub>=0.0m
- At Lower Valley
- Ground is Relative Soft
- Distance From River L>15m

Fig.9 Input Ground Conditions on Level 2.

OPS83 は前向きの推論システムで, 認知実行サイクルを前向きに機能させる。最初にすべての事実や条件をワーキングメモリにもっており, ルールを適用することでそれらの事実から導出した新しい事実をワーキングメモリに加えていき, 新たなルールがマッチし, 最終的な目標に向かってシステムが動いていく。

本システムではユーザーが最初に入力した時点から, 推論機構が知識ベースの各部分をコントロールして, ルール間の順序実行を保証している。

4. 診断例

中圧ガス溶接鋼管パイプライン網の耐震診断例について述べる。Fig.7 はパイプライン網を示している。管路構造として直管・ベント・T・バルブ・レジュアサーを含んでおり, 4 か所に地盤のボーリングデータがある。診断期間は 100 年としている。Fig.8 は Fig.7 中の ①,

Table 3 Result of Diagnosis.

Site	Period T(sec)	Wave Propagation			Settlement			Lateral Flow			Uplift	
		displ. (cm)	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon$ (%)	displ. (cm)	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon$ (%)	displ. (cm)	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon$ (%)	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon$ (%)
①	0.407	0.315	339.6	0.0158	20.38	1372.7	0.0653	—	—	—	65.3	0.0003
②	0.416	0.332	352.8	0.0168	—	—	—	—	—	—	—	—
□	0.667	0.734	315.8	0.0150	105.23	7068.7	0.3300	129.3	8855.9	0.4200	—	—

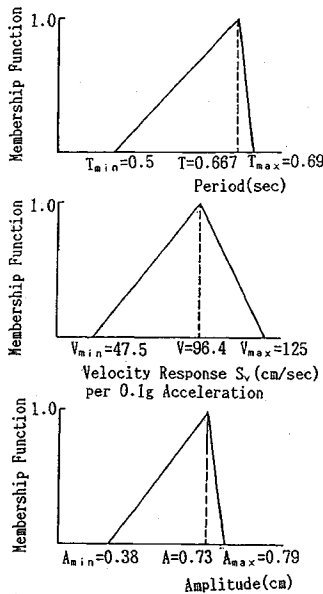


Fig.10 Membership Functions of Period, Velocity and Amplitude.

②位置の柱状図で、①位置は液状化のおそれのある地盤で、②位置は非液状化地盤である。Table 3はシステムの実行によって得た①、②位置での直管部の応答計算結果である。

さらに、Fig.7の□位置の直管部は地盤情報レベル2として、その入力データをFig.9に示している。液状化による沈下・側方流動が発生するおそれのある地盤である。Fig.10は得られた地盤特性値、地盤速度の帰属度関数であり、診断結果もTable 3に併記している。ただし、ここでの管路はφ100の塗覆装鋼管である。

### 5. むすび

本研究ではガスパイプラインの耐震安全性を診断できるファジィ・エキスパートシステムを紹介した。本システムの特徴は以下のようにまとめられる。

(1) ライフライン地震工学の知見を耐震診断システムに取り入れるために、OPS83言語とFORTRAN言語をリンクして、従来の数値演算プログラムを利用でき

るようにした。すなわち、ルール型言語と手続き型言語を混成したハイブリッドエキスパートシステムを開発した。管路の地震応答解析には三次元非線形地震応答解析プログラムおよびガス指針に基づく数値解析手法を用いている。

(2) 地盤情報を3つのレベルに分類して診断に利用できるようにして、現有の地盤情報の有効利用を図った。あいまいな地盤情報しか得られないレベル2ではこれらの情報を定量的に取り扱うために、ファジィ理論を応用している。

(3) 既存のガス管路のデータベースを構築しており、管種・呼び径の選択によって管路の材料特性、サイズ、継手特性値など諸データを診断に提供することができる。

(4) OPS83言語とC言語のリンクによってシステムにデジタイザ機能、ドキュメンテーション機能、およびグラフィック機能を搭載しており、システムの使用性の向上を図った。

### 参考文献

- 1) 安部憲広・滝 寛和：エキスパート・システム入門，共立出版，1986.12.
- 2) 古田 均・King-Sun Fu・James T.P. Yao：知識工学—エキスパートシステム—の構造工学への応用，土木学会誌，pp.28~33，1985.9.
- 3) 中村秀治：知識工学と土木構造物，第368号/I-8，pp.1~11，1987.10.
- 4) 中村秀治・松浦真一・松井正一・寺野隆雄：知識工学的な手法に基づく水力鋼構造物の寿命予測，土木学会論文集，第368号/I-5，pp.301~309，1986.4.
- 5) 中村秀治・松浦真一・寺野隆雄・篠原靖志：水力鋼構造物の寿命予測エキスパート・システムとその適用，土木学会論文集，第374号/I-6，pp.513~521，1986.10.
- 6) Forgy, C.L.：人工知能用言語 OPS83，パーソナルメディア，1986.12.
- 7) 日本ガス学会：ガス導管耐震設計指針，1982.3.
- 8) 水本雅晴：ファジィ理論とその応用，サイエンス社，1987.4.
- 9) 大久保高志・高田至郎・孫 建生：地中管路の耐震診断ファジィ・エキスパートシステム，土木学会第45回年次学術講演会，1990.10.
- 10) 高田至郎・高橋俊二：地中ライフラインシステムの地震

- 危険度解析, 建設工学研究所報告, No.21, 1979.11.
- 11) Seed, H., Idriss, I. M. and Fred, W. K. : Characteristics of Rock Motions During Earthquakes, SM5, pp.1199~1218, 1969.
- 12) 河角 広: 地震災害, 共立出版, pp.167~200, 1983.10.
- 13) 岩崎敏男・龍岡文夫ほか: 砂質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, 1978.
- 14) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化, 技報堂出版, 1980.
- 15) 田邊揮司良・高田至郎: 地盤沈下を受ける地中管路の設計式と適用, 土木学会論文集, 第374号/I-6, pp.583~602, 1986.10.
- 16) 東畑郁生・山田和彦: 地盤の液状化による永久変位量の簡易予測式, 土木学会第44回学術講演集, 1989.11.
- 17) 高田至郎・田邊揮司良ほか: 地中立体配管路の沈下・耐震解析, 第38回土木学会年次講演会講演集, pp.727~728, 1983.9.
- 18) 高田至郎・高谷富也: 地下埋設通信設備の地震時信頼性評価法, 建設工学研究所報告, No.30, pp.25~48, 1989.12.

(1990.7.18 受付)

## AN EXPERT SYSTEM FOR DIAGNOSIS OF EARTHQUAKE PROOFNESS OF UNDERGROUND LIFELINES

Shiro TAKADA, J. S. SUN, Takashi OKUBO and Yasuo OGAWA

This paper reports an expert system for diagnosis of earthquake proofness of gas pipelines with the aid of OPS 83 tool. The fuzzy theory was employed to estimate seismic risk on the base rock, ground response and pipeline responses which were obtained by jointing the OPS 83 tool with ERAUL (Earthquake Response Analysis of Underground Lifelines) computer program written by FORTRAN. Further, data base related with gas buried pipes was created including pipe materials, size, strength and joint characteristics. Interfaces of digitizer, documentation and graphic display convenient for users, were introduced. For an example study, a middle pressure gas pipeline was diagnosed by the developed expert computer system with pipe configuration such as straight, bend, tee, valve and reducers buried in the ground of possible liquefaction and settlements.