

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

AN EXPERT SYSTEM FOR LIFE TERM PREDICTION OF HYDROPOWER STEEL STRUCTURES

中村秀治*・松浦真一*・寺野隆雄**・篠原靖志***

By Hideharu NAKAMURA, Shinichi MATSUURA, Takao TERANO and Yasusi SINOHARA

Aiming to establish the life term prediction method of existing hydropower steel structures, various techniques which reported previously, such as simplified data acquisition, structural analysis program, data base, and expert system, were investigated.

The purpose of this paper is to describe the configuration and knowledge bases of the expert system in detail, and to show the application results of the system to radial gates of 25 sites. Especially, effectiveness of AHP (Analytic Hierarchy Process) Method to determine the weights among ambiguous qualitative data, such as appearance, operational condition, environment and others, is emphasized, and essential diagnosis rules for the expert system of existing structures are pointed out.

Keywords: expert system, life term prediction, AHP

1. ま え が き

既設の土木構造物の的確な保守・運用, および寿命予測が重要課題となりつつある現状に鑑み, 水力鋼構造物の健全性評価, 寿命予測評価技術の検討に着手した。ダムゲート, 水圧鉄管, 水路橋, スクリーンパーなどが代表的な水力鋼構造物であるが, ダムゲートの重要性が高いこと, および各構造物の経年劣化特性に共通点が多いことを考慮し, 特にダムゲートに焦点を絞った検討を行った。その概要は参考文献1)に示したとおりであるが, データベース構築, 残存板厚および腐食形状の簡易計測方法, 簡易構造解析手法, エキスパート・システム作成, の4つが主要課題となり, 特に, 収録されたデータに基づく健全性判定, 寿命判定方法を考える過程で, エキスパート・システムの重要性が強く認識された。専門的判断を整理し明文化して判定基準を構成するならば, エキスパート・システムの構築は容易であり, かつその構造物診断への適用は, 客観性, 迅速性, かつ共通性の観点からきわめて有効と考えられる。特に, エキスパート・

システムがそれのみ単独でなく, FORTRANによる数値解析システムおよび質的量的に豊富な情報をもつデータベースと結合して用いられるとき, 有用性は飛躍的に高まるものと予想される。

本論文では, 先に概要のみ報告¹⁾した“水力鋼構造物の寿命予測エキスパート・システム”について, より詳細に機能構成, 知識ベース, 推論方式および出力形式について述べ, 特に, あいまい性の扱いに関連して, 主観的評価項目(外観, 操作性, 等)間のウェイト付けの根拠として, 階層分析法(AHP)^{2),3)}の適用に言及した。さらに, データベースに収録済みの25地点のダムゲート(ラジアルゲート)データを入力し, その適用結果の妥当性を確認したが, 同時に, 既設構造物の診断を目的としたエキスパート・システムに重要なルールおよび改良すべき方向についての指摘を行った。

2. 水力鋼構造物の寿命予測エキスパート・システム

エキスパート・システムの多くは, 専門家の経験的知識などを整理, 収集して作られる知識ベースと, この知識ベースに基づいて推論処理を行う推論機構の2つの主要なコンポーネントから構成される。本システムにおいては, 水力鋼構造物(特にダムゲート)に関するデータ

* 正会員 工博 電力中央研究所土木研究所
(〒270-11 我孫子市我孫子1646)

** 工修 電力中央研究所経済研究所
(〒100 千代田区大手町1-6-1)

*** 理修 電力中央研究所経済研究所(同上)

ベースおよび簡易構造解析システムと専門家の判断との統合を旨としている。以下に、システム構成、知識ベース（フレーム構造、ルール）、階層分析法、寿命算定方法、推論方式および出力形式について述べる。

(1) システム構成

すでに、文献1)で述べているため、構成図のみ図1に示す。

(2) 知識ベース一覽

a) フレーム構造

ダムゲートについてのデータベース収録項目は文献4)に示したとおりであり、文献4)ではフレーム構造

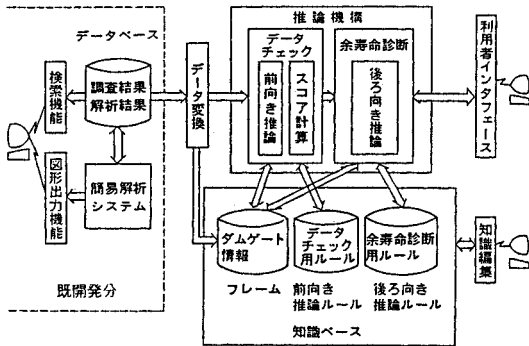


図-1 システム構成図(点線内はデータベース、簡易構造解析システムに関する既開発分)

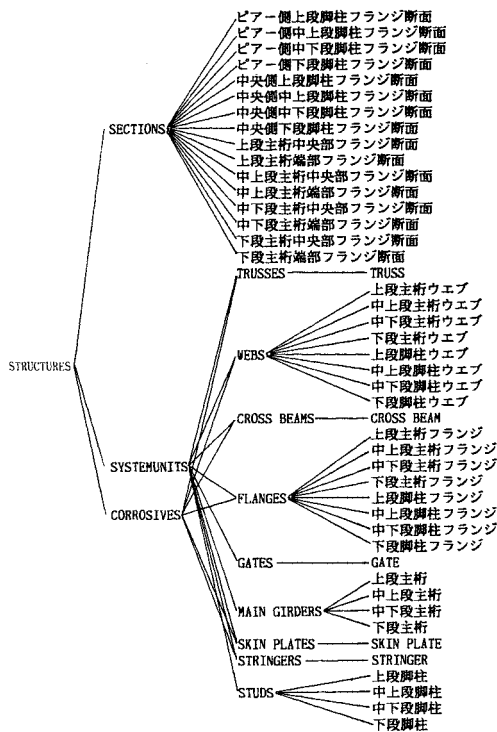


図-2 STRUCTURESのフレーム構造

は各項目間の関係を分類・整理して示した。本論文では、推論処理で利用する属性の継承関係が明確になる形でフレーム構造を示しており、物理的なゲートの構造を表わす部分 (STRUCTURES) と、データ項目値を表わす部分 (VALUES) とに大きく分けられている (図-2, 3)。

STRUCTURES の中心になるのは SYSTEMUNITS であり、SYSTEMUNITS クラスに属する各フレームはゲートの各構成部位 (TRUSS, WEBS, ...) を表わす。フレームはある構成部位が何の部分であり、また逆に何から成るかを示すスロット (Super-SYSTEMUNITS, Sub-SYSTEMUNITS) をもっている。各スロット値は、上位概念、下位概念に対応するものである。

構成部位の中には、腐食するという性質をもつものがある。このような部位はどれも腐食率、腐食の程度などの情報をもつ。そこで、このような共通する性質に対して CORROSIVES というクラスを定め、このクラスに属するフレームは、腐食率、腐食の程度などの情報に対応するスロットをもつようにしている。SECTIONS クラスに属するフレームは、フランジ断面の情報をもっている。

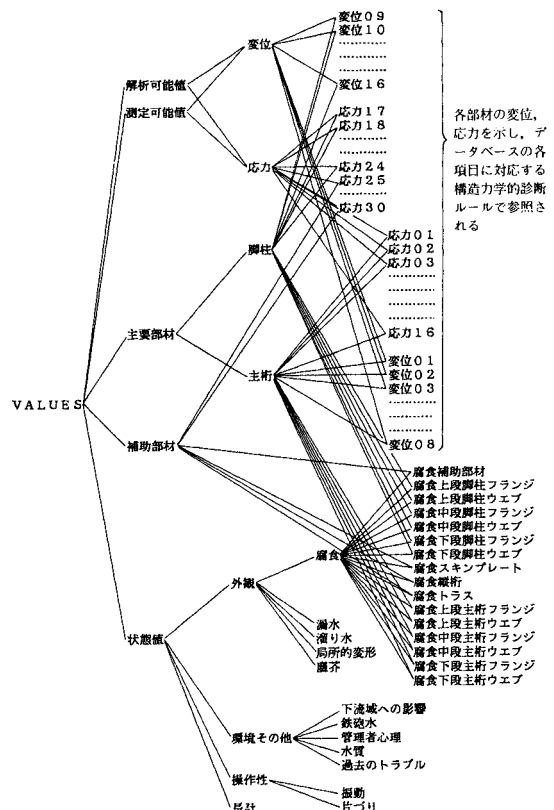


図-3 VALUESのフレーム構造

一方、VALUES はデータベースに含まれているゲートの定量的なデータを、複数の視点からとりまとめたものであり、これに属するユニットは各データ項目に対応している。応力 (STRESS. VALUES) と変位 (DEFLECTION. VALUES) は、ともに解析可能値 (ANALYZABLE. VALUES)、測定可能値 (MEASURABLE. VALUES) の両方の性質をもち、各データ項目は主要部材 (MAIN. MEMBER. VALUES) と補助部材 (AUXILIARY. MEMBER. VALUES) に分類される。

さらに、SYSTEMUNITS クラスと VALUES クラスのフレームは互いに密接に関連している。このような2つのクラスを設けることによって、ゲートの種類によって異なる構造の違いを、ルールから独立して扱えるようになり、また、各部位の値や計算方法が共通して取り扱えるようになる。

解析値が得られるデータ (ANALYZABLE. VALUES の要素) については、まずデータ入力時に、後述の SET. DEPENDENTS. RULES を起動し、ゲートの測定時の水深から、測定値の補正係数を得る。補正係数は、代表的形状のゲートについて、(測定時の水深/設計水深)=0.6, 0.7, 0.8, 0.9 の条件で、簡易構造解析システムを用いて応力解析することにより求めており、表一に示すとおりである。

次に、CHECK. RELIANCE. RULES により、補正値と解析値を比較してデータの信頼性を検討し、推論過程で補正値と解析値のいずれを採用するか決定する。

状態値 (STATE. VALUES) はゲートの定性的なデータをとりまとめたものであり、外観状態 (APPEARANCE. VALUES)、環境状態 (ENVIRONMENT. VALUES)、操作状態 (OPERATION. VALUES) などの概念から構成される。これらには4段階の値(“良い”:0, “概ね良い”:1, “良くない”:2, “かなり悪い”:3, の4段階)に加えて、この値を評価するための重み係数(ウェイト)が与えられている。状態値 (STATE. VALUES) 全体の評価は、各項目の重みつき平均値で定められている。

b) ルール

IF-THEN 形式で書かれたラジアルゲートに関する

表一 測定水位が低い場合の補正係数 (ラジアルゲートに対して適用)

	2主桁		3主桁				4主桁		
	上段	下段	上段	中段	下段	上段	中下段	中下段	下段
0.55 < h/H ≤ 0.65	8.06	1.94	—	3.08	1.95	—	4.70	2.51	1.87
0.65 < h/H ≤ 0.75	3.94	1.55	9.71	2.14	1.57	—	2.78	1.85	1.52
0.75 < h/H ≤ 0.85	2.30	1.29	3.36	1.59	1.31	7.74	1.84	1.45	1.29
0.85 < h/H ≤ 0.95	1.47	1.12	1.69	1.24	1.13	2.11	1.31	1.18	1.12
0.95 < h/H ≤ 1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

h: 測定水位, H: 設計水深, —は補正不可能を意味する。

ルールは、次の (i) ~ (iv) の4つのルール群から成る (図一4)。ローラーゲートの場合もほぼ同様であるが、脚柱に関する項目が削除される。

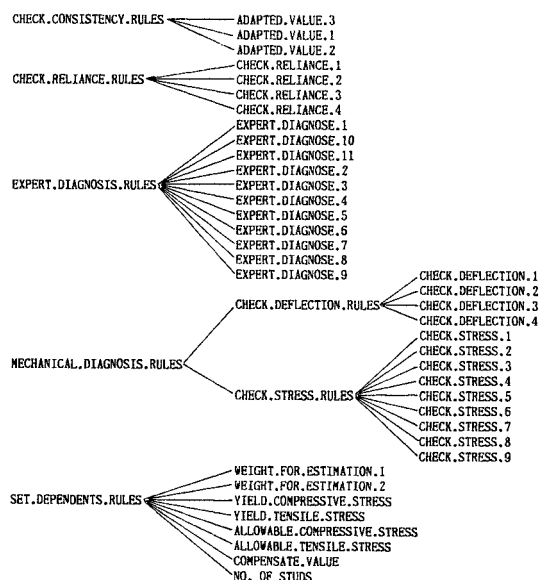
(i) CHECK. RELIANCE. RULES, CHECK. CONSISTENCY. RULES

解析、実測に基づく応力、変位等の数値データの信頼性を判定するルール群であり、前向きに実行する。

- ① IF (数値データの信頼性が高い)
THEN (以後の推論には、解析値と補正値 (測定値) のうち厳しい方を用いよ)
- ② IF (数値データの信頼性が低い)
THEN (以後の推論には解析値を用いよ)
- ③ IF ($\left| \frac{(\text{主要部材の解析値}) - (\text{主要部材の補正値})}{(\text{主要部材の解析値})} \right| < 0.3$)
THEN (数値データの信頼性は高い)
- ④ IF ($\left| \frac{(\text{主要部材の解析値}) - (\text{主要部材の補正値})}{(\text{主要部材の解析値})} \right| \geq 0.3$)
THEN (数値データの信頼性は低い)
- ⑤ IF (解析値のみがある)
THEN (数値データの信頼性は低い)
- ⑥ IF (解析値と補正値の符合が異なる)
THEN (数値データの信頼性は低い)
- ⑦ IF (補正値があつて、かつ解析値がない)
THEN (補正値を以降の推論に使うが、数値データの信頼性は低い)

(ii) SET. DEPENDENTS. RULES

各種の物理定数をセットするルール群である。



図一4 ダムゲートに関するルール群

- ① 許容応力（引張）を定める。
- ② 許容応力（圧縮）を定める。
- ③ 降伏応力を定める。
- ④ ラジアルゲートの場合、主桁の段数に等しく脚柱の段数を定める。
- ⑤ 測定水深をもとに測定値の補正值を求める。

(iii) MECHANICAL DIAGNOSIS RULES

構造力学的情報に従って診断を行うルール群であり、変位と応力の2つに分けられる。後向きに実行する。

(iii-1) CHECK DEFLECTION RULES

- ① IF (最大変位 > (純径間/800) かつ (片吊りがかなり激しい))
THEN (取替え)
- ② IF (最大変位 > (純径間/800) かつ (振動がかなり激しい))
THEN (取替え)
- ③ IF (最大変位 > (純径間/800) かつ (漏水がかなり激しい))
THEN (取替え)
- ④ IF (最大変位 > (純径間/800) かつ (①, ②, ③以外))
THEN (補修)

ただし、最大変位 = max. {max(補正值(V), 解析(V))
V ∈ 主要部材}

(iii-2) CHECK STRESS RULES

- ① IF (許容引張応力 < 作用引張応力 < 降伏応力)
THEN (作用引張応力は危険)
- ② IF (作用引張応力 ≥ 降伏応力)
THEN (取替え)
- ③ IF (許容圧縮応力 < 作用圧縮応力 < 1.5 × 許容圧縮応力)

THEN (作用圧縮応力は危険)

- ④ IF (作用圧縮応力 ≥ 1.5 × 許容圧縮応力)
THEN (取替え)
- ⑤ IF (作用応力が危険と判定された回数 > 1)
THEN (取替え)
- ⑥ IF (作用応力が危険と判定された回数 = 1)
THEN (補修)
- ⑦ IF (脚柱間連結方式がトラスまたはKトラス、かつ、座屈安全係数 < 1)
THEN (取替え)

ただし、座屈安全係数とは、暫定的に、簡易構造解析

表-2 経験的診断項目と評価方式

	項目	評価点	ウェイト	評価結果
外観	主桁	0.1, 2, 3	0.25	Σ(評価点×ウェイト)
	脚柱	0.1, 2, 3	0.25	
	スキンプレート	0.1, 2, 3	0.10	
	縦桁	0.1, 2, 3	0.05	= 0.0~1.0 良い
	補助横桁	0.1, 2, 3	0.05	= 1.0~1.5 概ね良い
	脚柱間トラス	0.1, 2, 3	0.05	= 1.5~2.0 良くない
	漏水	0.1, 2, 3	0.10	= 2.0~3.0 かなり悪い
	溜水	0.1, 2, 3	0.05	
	塵芥	0.1, 2, 3	0.05	
	局所的変形	0.1, 2, 3	0.05	
操作性	振動	0.1, 2, 3		max(振動評価点, 片吊り評価点) = 0 良い
	片吊り	0.1, 2, 3		= 1 概ね良い = 2 良くない = 3 かなり悪い
環境その他	水質、流(地)砂量	0.1, 2, 3	0.0833	Σ(評価点×ウェイト)
	鉄銹水	0.1, 2, 3	0.0833	= 0.0~1.0 良い
	下流域への影響	0.1, 2, 3	0.25	= 1.0~1.5 概ね良い
	管理者の心理、信頼度	0.1, 2, 3	0.25	= 1.5~2.0 良くない
	過去のトラブル	0.1, 2, 3	0.0833	= 2.0~3.0 かなり悪い
経年経過		0 or 3		= 0 40年未満 = 3 40年以上

表-3 EXPERT DIAGNOSIS RULES 一覧

外観	操作性	環境その他	経過年数	判定	ルール番号
良い	良い			現状のまま使用可	①
	概ね良い		40年未満	現状のまま使用可	②
	良くない		40年以上	補修が必要	③
概ね良い	かなり悪い	良い		補修が必要	④
		概ね良い		補修が必要	⑤
	良くない	40年未満	取替え	⑥	
	かなり悪い	40年以上	現状のまま使用可	⑦	
		40年未満	現状のまま使用可	⑧	
良くない	かなり悪い	良い		補修が必要	⑨
		概ね良い		補修が必要	⑩
	良くない	40年未満	補修が必要	⑪	
		40年以上	取替え	⑫	
かなり悪い	良い	良い		補修が必要	⑬
		概ね良い		補修が必要	⑭
	良くない	40年未満	取替え	⑮	
	かなり悪い	40年以上	補修が必要	⑯	
	概ね良い	良い	40年未満	補修が必要	⑰
		概ね良い	40年以上	取替え	⑱
	良くない	良くない		取替え	⑲
		かなり悪い		取替え	⑳

システムにより求めた座屈安全率をさらに4で割った値とした。

⑧ IF (脚柱間連結方式がラーメン, かつ, 座屈安全係数<2)

THEN (補修)

⑨ IF (小開度放流時応力値振幅>20 kgf/cm² (1.96 MPa))

THEN (補修)

これらの応力に関する診断ルールは、データベースに収録された主要部材のすべての応力値について適用される。

(iv) EXPERT. DIAGNOSIS. RULES

経験的診断ルール群であり、後向きに実行される。表一2に示す評価方式で4つの事項

- 外観評価
- 操作性評価
- 環境その他の評価
- 経過年数

について、4段階評価(ただし、経過年数のみ2段階評価)した後、表一3に示すルールに従って行う。ただし、知識ベース(図一4)中では整理統合して等価な11ルールにまとめている。

なお、表一2中、各項目間のウェイト付けを行っているが、ウェイトの決定にあたっては階層分析法(Analytic Hierarchy Process)^{2),3)}を用いた。この方法の概要は後述する。また、操作性評価の項目については、振動、片吊りのどちらも安全性および寿命判定の点から無視できないため、ウェイト付けのかわりにmax. を使って評価結果を出している。

c) 階層分析法(AHP)に基づくウェイト付け

評価項目間のウェイト決定にあたって、階層分析法が1つの有効な手段となる。この手法は、各項目間の重要度の比を一对比較して得たデータをもとに、各項目の

ウェイトを決定するもので、多目的計画問題を解く場合にしばしば用いられている⁷⁾。たとえば、S₁, S₂, S₃の評価項目があったとき、その重要度をW₁, W₂, W₃とする。このとき、各評価項目の重要度の比についての一对比較値(W₁/W₂, W₂/W₃, W₁/W₃)を利用者(専門家)に質問する。一对比較は、図一5に示すような5段階評価、もしくは7段階で行うのが適切とされている。一对比較に一貫性があれば、その結果得られる重要度比の行列(一对比較行列)と各ウェイトW_i(i=1, 2, 3, W₁+W₂+W₃=1)の間に次式が成立する。

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{W_1}{W_2} & \frac{W_1}{W_3} \\ \frac{W_2}{W_1} & 1 & \frac{W_2}{W_3} \\ \frac{W_3}{W_1} & \frac{W_3}{W_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{pmatrix} = 3 \cdot \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{pmatrix}$$

AHPはこれを利用して、一对比較行列の固有値、固有ベクトルを求めることで、各W_iを求めるものである。上式が成立していれば、一对比較行列はランク1で、評価項目数nに等しい固有値をもつ。そこで、実際に得られた固有値の大きさとnとを比較することで、結果の信頼度を調べることができる。これには、通常、Consistency Index CI=(固有値-n)/(n-1)、ならびに、Consistency Ratio CR=CI/CI*が用いられる。ただし、CI*は全くランダムな一对比較行列から実験的に得られるCIのことであり、文献2), 3)に表で与えられている。

CI, CRとも0.1以下なら整合的である(使用できるとされている^{2),3)}。

一例として、表一2中の外観評価項目(主桁, ~, 局所の変形までの10項目)について、一对比較行列を複数の保守担当者に質問したところ、いずれもほぼ同様の結果を得た。図一5には最もCI, CRの小さかった分析

乙 甲	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ウエ-ト	備 考
1	1	1	3	5	5	5	3	5	5	5	.249600	CI = 0.03 CR = 0.047 最大固有値 = 10.2820
2	1/1	1	3	5	5	5	3	5	5	5	.249600	
3	1/3	1/3	1	3	3	1	1	3	3	1	.985856E-01	
4	1/5	1/5	1/3	1	1	1	1/3	1	1	1	.442556E-01	
5	1/5	1/5	1/3	1/1	1	1	1/3	1	1	1	.442556E-01	
6	1/5	1/5	1/1	1/1	1/1	1	1/3	1	1	1	.506477E-01	
7	1/3	1/3	1/1	3	3	3	1	3	3	3	.119820	
8	1/5	1/5	1/3	1/1	1/1	1/1	1/3	1	1	1	.442556E-01	
9	1/5	1/5	1/3	1/1	1/1	1/1	1/3	1/1	1	1/3	.404614E-01	
10	1/5	1/5	1/1	1/1	1/1	1/1	1/3	1/1	3	1	.585181E-01	

注) 上記マトリックスの記入条件として、甲が乙より "非常に重要" : 5, "やや重要" : 3, "同じ位重要" : 1 "やや重要でない" : 1/3, "あまり重要でない" : 1/5. と指定した。

図一5 階層分析法(AHP)によるウェイト付け(表一2の外観評価に対応)

結果を示す。

複数人で出したウェイトが互いに著しく異なる場合は、担当者の意見が集約されていないケース、項目の選択が不適切なケースの2つが考えられる。前者については、結果を提示して一対比較行列の再作成を行う、または、複数人が示した一対比較行列の要素ごとの幾何平均をとる対策がある。後者については、選択項目の再検討が必要である。本システムの開発にあたっては十分な整合性が得られたので、これらの修正は行っていない。

d) 寿命算定法

構造力学的診断あるいは経験的診断のいずれによっても現状のまま使用可能と判定されたケースについて、寿命算定を行う。寿命算定は次の4つの観点から行う。

- 主要部材の腐食進行
- 補助部材の腐食進行
- 変位の経年変化
- 応力の経年変化

各観点からの寿命算定は下記の計算規則に従う。

(i) 主要部材の腐食進行からみた寿命年数

$$\text{Min.} \left\{ \frac{\text{主要部材 (A) の設計板厚 (cm)}}{\text{主要部材 (A) の最大腐食率 (cm/年)}} \right\} \times 0.3 - \text{使用年数}$$

(ii) 補助部材の腐食進行からみた補修を必要とするまでの年数

$$\text{Min.} \left\{ \frac{\text{主要部材 (B) の設計板厚 (cm)}}{\text{主要部材 (B) の最大腐食率 (cm/年)}} \right\} \times 0.3 - \text{使用年数}$$

(iii) 変位の経年変化からみた寿命年数

$$\frac{\text{純径間 (cm)} / 800 - \text{最大変位 (cm)}}{\text{変位変化率 (cm/年)}}$$

(iv) 応力の経年変化からみた寿命年数

$$\frac{\text{許容応力} - \text{主要部材の最大応力 (kg/cm}^2\text{)}}{\text{応力変化率 (kg/cm}^2\text{/年)}}$$

これらは、それぞれ

- (i) 主要部材の腐食厚が設計板厚の30%に達するまでの年数。
- (ii) 補助部材の腐食厚が設計板厚の30%に達するまでの年数。
- (iii) 最大変位が(純径間/800)を越えるまでの年数。
- (iv) 主要部材の最大応力が許容応力を越えるまでの年数。

を算定するものであり、「腐食の進行は年数に比例する」との前提に立っている。

上式中、主要部材・補助部材の最大腐食率 (cm/年) は、腐食厚を年数で割って求めており、変位変化率 (cm/年) と応力変化率 (kg/cm²・年) は同一ゲートについて設計板厚と腐食残存板厚で簡易構造解析して求めている。

表—4 本システムの推論方式

現状のまま使用可/補修/取替え	構造力学的特性 ・変位 ・応力 ・振動 ・座屈 (ラジアルゲートのみ) 経験的判断
寿命 (何年で補修/取替え)	主要部材の腐食 補助部材の腐食 主要部材の応力 主要部材の変位

る。いずれにしても概略値であるため、寿命年数、あるいは補修が必要となるまでの年数が、

- 5年以下
- 5~10年
- 10~20年
- 20~50年
- 50年以上

という程度の判断に使用する。

(3) 推論方式

本エキスパート・システムは、当該構造物が、

- 現状のまま使用可能
- 補修が必要
- 取替えが必要

であるかどうか判断し、ついで、現状のまま使用可能の場合、何年後に修理または取替えの必要があるかを判定して提示する。

これらの診断は、本質的にある程度のあいまいさを含むものであり、寿命判定に対する考え方¹⁾に応じて複数の推論方式が可能である。本システムでは、あいまいさを処理するために、階層分析法に基づくスコア計算方式を導入し、後述の複数の解の提示という方式を採用した。これは次の理由によるものである。

- (i) ダムゲートのような構造物を対象とする場合、個々の推論結果はデータまで遡って明確に説明できるものでなければならない。そのためには、スコア値を陽に計算して、評価結果に各項目がどれだけ寄与し得るかを説明する方が適切である。
- (ii) 本システムの下す複数の推論結果は互いに矛盾する可能性があるが、客観的な寿命評価法が確定していない現状においては、システムの利用者に最終的判断をまかせるべきである。そのためには、システムが結論し得るすべての解を表示することが適切である。

すなわち、本システムでは1つのダムゲートの情報に対して、表—4に示す6通りの項目について診断を行い、

それぞれの結果と推論過程とを利用者に提示する。利用者はシステムの出力する複数個の結果を利用して最終的な判断を下すことになる。

(4) 出力形式

現段階で本システムは LISP マシン (Symbolics 3670) 上で作動しており、エキスパート・システム構築用ツール KEE (Knowledge Engineering Environment)^{5),6)} のグラフィック機能を利用して、推論結果、推論経過、推論の説明を端末上に表示する。

a) 推論結果

- 本システムを適用した構造物の名称
- 構造力学的診断結果
- 経験的診断結果
- 定性的データの評価スコア (棒グラフ表示)
- 寿命算定結果 (棒グラフ表示)

b) 推論経過

順次進行する以下のような推論作業の状況を表示する。

- ルール中の IF 条件と、判定中の状況。
- 適用中のルール。
- チェックした述語の履歴。

c) 推論の説明

どのような理由、ルールに従って、現状のまま使用可/補修が必要/取替え、と判断したか説明する。

3. 本エキスパート・システムの適用結果

(1) 本システムの判定結果

ダムゲートに関するデータベースの中から、25 か所のラジアルゲートのデータを取り出し、本エキスパート・システムによる判定を行った。結果は表-5 に示したとおりである。

構造力学的診断では、前述のとおり、変位についての診断ルール (CHECK. DFFLECTION. RULES) および、応力についての診断ルール (CHECK. STRESS. RULES) を使用して、使用可/補修/取替えのいずれかを判定している。表中には、補修/取替えの場合、適用したルールおよび判定にかかわった変位または応力を示している。たとえば、No.15 のゲートでは、下段脚柱のみの応力が許容応力を越えているため、“補修が必要”との指摘がなされた。

経験的診断には、EXPERT. DIAGNOSIS. RULES を使用し、表-5 中に、判定結果および補修/取替えの判断を下したルール、さらに外観、環境その他、操作状態 (表-2 参照) の評価値と、経過年数を示した。たとえば、No.14 では外観がよくなく、かつ経過年数が長いので取替えが必要と判断されている。

寿命予測は、前述の算定式を用いた結果が表-5 中に示されている。

(2) 判定結果についての考察

表-5 システムの判定結果一覧

No	構造力学的診断			経験的診断			寿命予測				備考		
	判定結果	適用ルール	判定に係った応力	判定結果	適用ルール	評価 外観 環境 操作性	年数	主要部材の腐食	補助部材の腐食	変位		応力	
1	使用	—	—	使用	—	1.25 1.08 0.00	40	20~50年	50年以上	50年以上	50年以上		
2	使用	—	—	使用	—	1.45 0.17 0.00	40	20~50年	50年以上	50年以上	50年以上		
3	使用	—	—	使用	—	1.45 0.17 0.00	40	20~50年	50年以上	50年以上	50年以上		
4	使用	—	—	使用	—	1.25 0.42 0.00	40	20~50年	50年以上	50年以上	50年以上		
5	使用	—	—	使用	—	1.43 0.42 0.00	40	50年以上	50年以上	50年以上	50年以上		
6	使用	—	—	補修	経験Rule③	1.45 0.42 1.00	40	—	—	—	—		
7	使用	—	—	使用	—	0.65 0.67 0.00	<40	50年以上	50年以上	50年以上	50年以上		
8	使用	—	—	使用	—	0.45 0.67 1.00	40	20~50年	50年以上	50年以上	50年以上		
9	使用	—	—	使用	—	0.75 0.42 1.00	40	50年以上	50年以上	50年以上	50年以上		
10	使用	—	—	使用	—	0.05 0.17 0.00	<40	50年以上	50年以上	50年以上	50年以上		
11	使用	—	—	使用	—	1.00 0.42 0.00	40	50年以上	50年以上	50年以上	50年以上		
12	使用	—	—	使用	—	0.95 0.99 1.00	40	—*1	50年以上	50年以上	50年以上		
13	使用	—	—	使用	—	1.00 0.42 0.00	40	50年以上	50年以上	50年以上	50年以上		
14	使用	—	—	取替え	経験Rule④	1.55 1.67 0.00	40	—	—	—	—		取替え済み
15	補修	応力Rule⑥	脚柱下部応力	使用	—	0.20 0.92 0.00	<40	—	—	—	—		
16	使用	—	—	使用	—	0.80 0.33 0.00	40	50年以上	50年以上	50年以上	50年以上		
17	使用	—	—	使用	—	0.95 0.42 0.00	<40	50年以上	50年以上	50年以上	50年以上		
18	使用	—	—	取替え	経験Rule⑤	2.00 1.25 1.00	40	—	—	—	—		取替え済み
19	使用	—	—	使用	—	0.15 0.42 0.00	<40	50年以上	50年以上	50年以上	50年以上		
20	使用	—	—	使用	—	1.00 0.33 0.00	40	50年以上	50年以上	50年以上	50年以上		
21	補修	変位Rule④	—	使用	—	0.00 0.42 0.00	<40	—	—	—	—		補修済み
22	使用	—	—	使用	—	0.60 0.42 0.00	<40	50年以上	50年以上	50年以上	50年以上		
23	使用	—	—	補修	経験Rule⑥	1.15 0.67 2.00	40	—	—	—	—		取替え済み
24	使用	—	—	使用	—	1.00 1.00 0.00	40	50年以上	50年以上	50年以上	50年以上		
25	使用	—	—	取替え	経験Rule⑥	1.60 1.25 2.00	40	—	—	—	—		

*1 脚柱構造がラチス柱であり、レーシング材を等価板厚のウェブに置換しているため、算定式が使用できない。

全ケースについて、入力データと判定結果を詳細に対比することにより、設定したルールどおりの判定がなされていることを確認した。したがって、判定結果の妥当性、本システムの有用性は、設定したルールに全面的に負っている。

表-5は、2.(2)で述べた現時点におけるルールに基づく判定結果である。入力データには、25ゲート中、40年以上経過したものが18含まれており、かなり古いゲートを集めているといえる。すでに取替え済みのゲートも含まれている。

構造力学的診断結果については、No.15およびNo.21が補修が必要との判定になっている。これらは形状不整に起因して脚柱に大きな曲げモーメントが作用していることが確認されており、この判定は妥当である。他について多少問題ありと思われるケースがあるが、許容応力と(純径間/800)の変位を基準値にしているルールのみでは見逃すのもやむを得ない。

経験的診断については、外観、環境その他、操作性の3項目を議論する以前の問題があるが、ここではその点の言及は避けることにする。No.6、No.23については補修が必要となっているが、スキンプレーートの腐食、操作性、年数からみて判定は適切と考えられ、現に、No.23は取り替え済みである。また、No.14、No.18、No.25については、取り替えとなっているが、外観状態、操作性、年数からみて適切な判断と考えられ、すでに数年前に取り替えられたものもある。

構造力学的診断、経験的診断の両者で、現状のまま使用可と判定されたケースについて寿命予測が行われているが、算定の基になる値を

腐食率=0.0007~0.0061 cm/年

変位変化率=0.0004~0.0015 cm/年

応力変化率=0.2~1.0 kgf/cm²/年

(19.6~98 kPa/年)

としているがかなり大まかな値である。したがって、この値の設定に今後の問題を残しているが、No.1、No.2、No.3、No.4、No.8の一部を除いて、すべて50年以上という結果である。

ゲートにおける問題点の多くは製作・施工時に生じたものであり、40年以上を経た多数のゲートが何ら問題なく使用されつつある現状に鑑み、この判定も概ね妥当と考えられる。

4. ルールのチューニング、今後の予定

3.で述べたとおり、現状のルールによってほぼ適切かつ常識的な判定結果の得られることが確認された。しかし、以下の点が今後改良すべき事項として浮びあがった。

- (i) 構造力学上の値は、現状で設定しているルールに照らすだけでは、ほとんどの場合判定に影響を与えない。実際にはルールで定めた基準値以下でも問題が生じることがあるが、経験的診断ルールで問題点の指摘ができなければ見逃す結果となる。したがって、構造力学的診断ルールの一層の精密化が必要である。
- (ii) 非常識なほど大きい変位、あるいは応力値その他が測定値に入っていたとき、測定ミスとして捨てるか、または崩壊に対する警告と判断するかのルールが不十分である。
- (iii) 単に基準値に照らした診断、経験的診断だけでなく、データベースに収録済みのすべてのデータを駆使した判定を行う方向にもっていく必要がある。たとえば、当該地点のゲートと同形式、同年代のものが存在する場所、それらの現状、将来計画など参考データとして出力することが考えられる。また、構造力学的に基準値に達していない場合でも、他地点での問題事例など参考までに出力するのも有益である。
- (iv) 同一ゲートで、異なる時点における測定データがある場合、経時変化をより精密に評価する方向でルールを設定していく必要がある。

以上の点で、ルールのチューニング、システムの改良を図ると同時に、データベースの拡充に努め、また、外観等の定性的データについて、さらに客観性を高めることを今後予定している。

5. 結 び

AI技術が急速に進歩し、計算機の一般ユーザーがエキスパート・システムを容易に構築できる状況になりつつある。エキスパート・システムの有効利用分野の1つは「診断」であり、判定の道具としてみれば、確率・統計的手法を適用するほど十分なデータが集まらず、あいまいさを残したままでの判定を求められる現象に比較的よく適合する。したがって、既設土木構造物の保守・管理を支援するためのシステムは、その機能(知識ベースの内容)次第で非常に有用なものとなるであろう。

現段階で著者らが構築したシステムの概要はすでに述べたとおりであるが、この基礎には、測定技術、簡易解析システム、データベースなどの開発をはじめとする長年の蓄積がある。本システムはここで得られた知見を生かして、約3か月で実現したものであるが、AI技術を用いなければ、この程度の期間で作成することは不可能であったと考えられる。また、従来さまざまな分野で開発されてきた計算機プログラムと比較して、本システムは客観的な評価基準が確立していない分野の課題につい

て、半ば試行錯誤的に開発を進めてきた点に特徴がある。エキスパート・システムの手法はこのような開発に適合しやすいものといわれている。実際、著者らも知識ベースの構築と本システムの試行を通じて、水力鋼構造物の診断を行うための知識をある程度まで系統的にとりまとめることができたと考えている。これらは本エキスパート・システムを利用しない状況のもとでも評価手引として役立つものである。

今後、保守・管理担当者の考えを幅広く取り込んで知識ベースの高度化を図り、さらに、数値解析システム、データベース・システムとの連けいを強化することによって、水力鋼構造物の寿命予測に真に有用なシステムとなるよう改良を加えていきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 中村秀治・松浦真一・松井正一・寺野隆雄：知識工学的手法に基づく水力鋼構造物の寿命予測，土木学会論文集，No. 368/I-5, 1986. 4.
- 2) Saaty, T. L. : A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structure, J. of Mathematical Psychology, 15, pp. 234~281, 1977.
- 3) Saaty, T. L. : The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, 1980.
- 4) 中村秀治・松井正一・松浦真一・寺野隆雄：ダムゲートの安全性判定および寿命予測のためのデータベース，電力土木，No. 199, 1985. 11.
- 5) Kunz, J. C., Kehler, T. P. and Williams, M. D. : Application Development Using a Hybrid AI Development Systems, AI Magazine, Vol. 5, No. 3, 1984.
- 6) Faught, W. S. : Functional Specifications for AI Software Tools for Electric Power Applications, EPRI Report, NP-4141, Research Project 2582-1, August, 1985.
- 7) 古川浩平・古田 均・仁多和英：一対比較法の最適耐震設計への応用に関する研究，土木学会論文集，No. 368/I-5, 1986. 4.

(1986. 4. 7・受付)