

知識工学的手法に基づく水力鋼構造物の寿命予測

LIFE TERM PREDICTION OF HYDROPOWER STEEL STRUCTURES BASED ON KNOWLEDGE ENGINEERING TECHNIQUES

中村秀治*・松浦真一*・松井正一**・寺野隆雄**

By Hideharu NAKAMURA, Shinichi MATSUURA, Shouichi MATSUI and Takao TERANO

In these days of stable growth of economy in Japan, proper operation and maintenance of existing structures which have been used for many years have become an important subject. Furthermore, making improvements in the study of this problem, it is pointed out that replacement plans of the structures based on life term prediction should be applied. However, as compared with operation and maintenance, life term prediction is much more difficult because of necessity of data base on material changes with the passage of time.

The purpose of this paper is to describe the investigation results of life term prediction techniques focusing on hydropower steel structures. They are composed of simplified data acquisition and structural analysis, data base, expert system and others. Especially expert system plays an important role among them.

1. ま え が き

わが国において、大規模な発電用ダムおよび関連した水路構造物が建造され始めたのは、昭和初期である。当時の建設記録、正確な製作図面等は乏しく、ゲート、鉄管類に至っては、インチ、尺などの単位によるものが見出されることもまれではない。当時の社会情勢、設計製作技術もおのずと推測できるが、低経済成長下の今日、このような50年近くを経過した水力構造物の安全性判断、適切な維持管理および適切な取り替え時期の決定は、1つの大きな課題である。

著者の一人は、古いダムゲートについて安全性調査を10年以上にわたって行ってきたが、個々のゲートの構造形式、外観状態等は多種多様である^{1),2)}。静応力測定、振動測定、残存板厚測定、材料試験、各種の構造解析により、使用状態における一応の安全性確認は行うものの、不確実な要素を残したままでの判断にならざるを得ない。それらは、製作施工時に生じた形状不整、初期応力、主要部材における腐食分布、頭のないようなリベットの

有効度、摺動部分の摩擦係数、などさまざまである。

長年月を経た構造物の診断にあたっては、それ自体の不確かさのほかに、観察者の主観による判断の相違が問題になる。水力鋼構造物に限らず、橋梁、タンク等多くの構造物で健全性判定を行う場合、所定のチェックリストに従って、各項目何段階かの評価を行い、総合得点に基づいて判断するケースが多い。しかしながら、チェックリスト各項目の選定とウェイト付けのほかに、個人の印象による記入結果の違いを最小限に抑える検討までは行われていないのが実状であろう。

現状における構造物の安全性判断からさらに一步踏み込んで、寿命予測、取り替え時期の決定となれば、寿命の定義とともに経時変化の把握が新たな課題として加わる。必然的に異なる時点でのデータが必要となり、データ取得量が飛躍的に多くなるだけでなく、データ保存、処理方法が検討されなければならない。したがって、測定および解析を簡便かつ迅速に行くと同時に計算機によるデータ処理が不可欠になる。同時に、判定結果の客観性を高めるためにエキスパート・システムに代表される知識工学的手法の採用が有望になる。

最近の電算機利用技術の1つの特徴は、システムに論理判断を行わせることであり、これに多機能の前後処理能力を有する構造解析システム、データベース技術を有

* 正会員 工博 電力中央研究所土木研究所
(〒270-11 千葉県我孫子市我孫子 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)

機的に組み合わせることにより、経年劣化した構造物の安全性判断、寿命予測のためのエキスパート・システムを構成することができる。エキスパート・システムについては、土木以外の分野を広く見回しても開発途上であり、いつの時点で開発完了というものでもなく、使用過程で改良されていくものであろう。

本論文は、水力鋼構造物の中でも特に、ダムゲート（ラジアルゲート、ローラーゲート）に焦点を絞り、知識工学的手法が寿命予測問題解決にどこまで迫り得るか、現時点における著者らの検討結果について述べたものである。

2. データベース

大量のデータを電算機入力し、必要に応じて短時間に加工して取り出すためにデータベースの検討が必要である。検索のためには、一定の形式でデータ入力される必要があり、かつ安易な形式変更は許されない。したがって、データ収録項目の選定は非常に重要である。以下に、ダムゲートについてのデータ収録項目、各項目の収録方法、使用目的、等について述べる³⁾。

(1) データ収録項目

ラジアルゲート、ローラーゲートについて、データ収録項目を次のように定めた。

a) データ収録年月日

b) ゲート概要

- ゲート名称
- 河川名
- 純径間、高さ、門数
- 設計水深、設計地震力、設計洪水量
- ゲート重量
- 材質、許容応力
- 水密方式、巻上方式
- 製造会社
- 使用開始年月日
- 使用中（経過年数）または更新（昭和 年）

c) 構造形態

- 接合方式
- 脚柱（ラジアルのみ）
 - 型式
 - 断面形状
 - 脚柱間連結方式

- 主桁
 - 断面形状
 - 段数

d) 外観状態

- 腐食状態
 - 主桁

脚柱（ラジアルのみ）

スキンプレート

補助部材

- 漏水
- 溜り水
- 塵芥
- 局所の変形

e) 運転状態

- 操作状態
 - 振動、片吊り
- 水質、流（堆）砂
- 環境関係
 - 鉄砲水、下流域の状態
- 管理者のゲートに対する信頼度
- 過去のトラブル
- 過去の補修歴
- 長期計画、取替予定

f) 基本形状

- 扉体半径（ラジアルのみ）
- 扉体高さ
- 扉体純径間
- ダムクレストからトラニオンピンまでの高さ（ラジアルのみ）
- 扉体最下部から各段主桁までの高さ
- 主桁
 - 断面形状
 - 脚柱接合位置（ラジアルのみ）
 - 脚柱接合幅（ラジアルのみ）

g) 板厚、断面積

- 主桁
 - ウェブ板厚
 - フランジ断面積（短辺×長辺）
- 脚柱（ラジアルのみ）
 - ウェブ板厚
 - フランジ断面積（短辺×長辺）
- スキンプレート板厚

h) 荷重

- 設計水位
- 設計震度
- その他の荷重

以下、実測値であり、ない場合空白とする。

i) 測定水位

j) 測定水位における変位

- 主桁
 - 中央部、端部
- 脚柱（ラジアルのみ）

k) 測定水位における応力値

- 主桁
中央部, 端部, 脚柱との接合部(ラジアルのみ)
- 脚柱 (ラジアルのみ)
ピアー側と中央側
- スキンプレート
パネル中央部と縁部
- 補助部材

l) 振動

- 小開度放流時
固有周期
応力振幅
- ハンマー加振
固有周期
減衰化

m) 最大腐食量, 最大腐食率

- 主桁
フランジ, ウェブ
- 脚柱 (ラジアルのみ)
フランジ, ウェブ
- スキンプレート
- 補助部材

(2) データ収録方法

(1) で挙げた各項目のデータ収録方法は次のとおり。

- a) ——収録日を記入。
- b) ——現場の資料を参照。
- c) ——図面上から, または外観調査時に判断。
- d) ——外観調査時に判断, または管理者から聴取。
この項目は主観が入りやすい。腐食についてはこれ単独ではなく, m) の結果等とあわせて判断すべきである。
- e) ——管理者から聴取, または実測値から判断。
- f) ——図面上から, または現場で寸法測定。
- g) ——図面上から, または現場測定。
- h) ——現場の資料を参照, または管理者から聴取。
- i) ——測定結果報告書を参照。
- j) ——測定結果報告書を参照。
- k) ——測定結果報告書を参照。
- l) ——測定結果報告書を参照。
- m) ——測定結果報告書を参照。

(3) 各データ項目の使用目的

(1) で挙げた各項目のデータは次の目的で使用される。

- a) ——検索する際のキー。
- b) ——検索する際のキー。使用年数は寿命予測の一判定要素。
- c) ——主として, 簡易構造解析の際のモデル作成。
- d) ——寿命予測する際, 測定値, 解析値にプラス α

の判定要素。

- e) —— d) と同じ。
- f) ——主として, 簡易構造解析の際のモデル作成。
- g) —— f) と同じ。
- h) ——主として, 簡易構造解析の際の荷重設定。
- i) ——測定条件把握。
- j) ——ゲートの実態把握, 解析値との照合。
- k) —— j) と同じ。
- l) —— j) と同じ。
- m) ——ゲートの実態把握, 経年変化の把握, 寿命予測の判定要素。

(4) データベースの利用方法

(1) で挙げたデータ項目数は, 1ゲートで約150である。電算機入力後のデータベースとしての利用方法は,

- (i) データの修正, 追加, 削除。
- (ii) 検索。
- (iii) 検索されたデータ群に対する統計処理。
- (iv) 後述する簡易構造解析システムへのモデル作成データ引き渡し。

等であり, 台帳, カードでの保存, 利用に比べて, 処理の高速化と柔軟な処理が可能となる。

3. 寿命予測を目的とした測定方法

データ取得のための測定方法は何ら知識工学とは関係なく, また, 特に変わった測定方法を採用するわけではないが, ゲートの老朽化の主要因が鋼材の腐食と摩耗に限られる実状に鑑み, その簡便な測定法は特に重要である。ここでは, 塗膜上からの鋼材の腐食表面形状測定および残存板厚測定の概要を述べることにする⁴⁾。

(1) 腐食表面形状の測定

従来, 腐食状態を知る目的には写真記録およびモデリングが用いられてきた。写真記録は腐食の分布等を定性的に判断するのに適し, モデリングは表面の型をとってそれを後で測定するため定量的な評価が行えるものである。こうした方法以外に腐食表面形状測定に利用可能な方法としては, 針接触式, ダイアルゲージ, 光・レーザービーム, モアレ等があるがこれらは従来法と同じく表面塗膜の除去と再塗装を必要とし, また, 取り扱いや作業量の面で必ずしも適当ではない。そこで, 塗膜除去の必要性のない簡便な測定法として渦電流式の変位計の利用を試みた。渦電流式変位計はセンサから金属面までの距離を非接触測定するもので塗膜を介しても距離の測定が可能である。しかし, これを直接凹凸の測定に用いるには, このセンサが磁気を利用していることにより, 測定レンジが短いという不都合がある。大型のセンサを用いれば測定可能距離は延びるものの面積の小さな凹凸に反応しなくなり, 逆に小さなセンサでは深い凹部が測定で

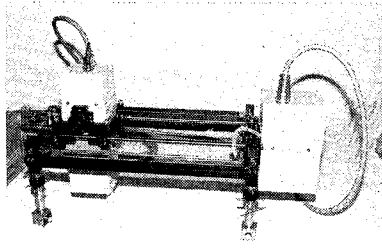


写真-1 腐食表面形状測定器

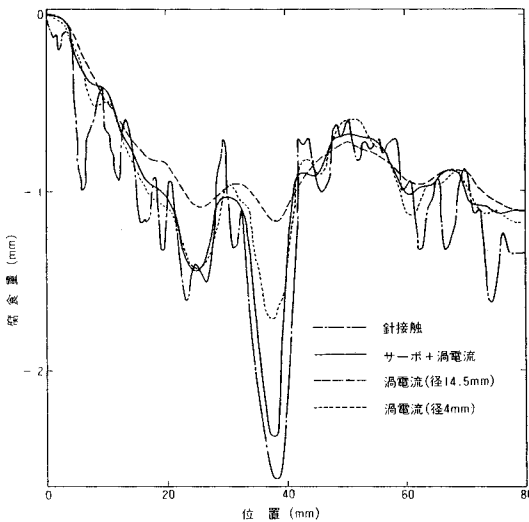


図-1 腐食表面形状測定器による測定結果の一例

きなくなるため必要な条件を満たすことは困難である。そこで渦電流式変位計にサーボ駆動機構を組み合わせ、センサと金属面との距離を一定に保持したまま測定する装置を試作した。この方式では小さなセンサが利用できるため微小な凹凸部にもよく反応し、かつ、大きな測定レンジが確保できる。測定器の形状を写真-1に示す。試作器と他の測定法とによる測定結果を比較した例を図-1に示す。試験片には実際の腐食した鋼構造物から切り出した板を用い、針接触式、サーボ+渦電流（試作器）、渦電流式径14.5mm、同径4.5mmによる測定結果を示している。針接触式の結果はリファレンスとしてよいと考えられるが、試作器の結果が他の渦電流式の場合に比して著しく良好であることがわかる。現在のところ、性能的には7、8mm以上の大きさの腐食について、深さ±10mm程度を0.02mmの精度で測定可能である。大きさ、重量の面でダムゲートの現場測定に用いるにはまだ改良の余地があるものの有望な測定法である。

(2) 残存板厚の測定

板厚測定には従来から超音波板厚計が広く用いられてきたが塗膜の除去が必要である。そこで、塗膜除去等の

不要な電磁超音波法による板厚測定の利用可能性調査を行った。電磁超音波法は基本的には通常の超音波法と同様の原理によるが、非接触で電磁誘導により超音波の送受信を行うところに特徴がある。(1)で用いた試験片等でテストした結果、通常の超音波法に比べてやや広い領域の平均的な板厚を測定値として示すが、塗膜(0.4mm)の影響をほとんど受けずに測定できることがわかった。大きさと重量の軽減に改良の余地がある。

4. 簡易構造解析システム

寿命予測するエキスパート・システムが、記憶(データベース)するだけでなく、解析力を備えて、判断・推論するために開発した簡易構造解析システムの概要について以下に述べる^{5),6)}。

(1) 解析モデルの作成

特にラジアルゲートの解析においては、各部材の立体的相互関係が強く、主桁と脚柱、スキンプレート、補助部材などに分けての検討は不適當である。したがって、構造全体をモデル化して、三次元有限要素解析する必要があるが、そのデータ作りをインタラクティブ(interactive)であるにしても手作業で行うとすれば、時間がかかり過ぎ、かつ作業員によって異なるモデルを作成する結果になる。

そこで、ラジアル、ローラーゲートをおのおの数10種類に類別し、おのおの要素分割データを内蔵することを試みた。データベースから、c)構造形態に関するデータを読み込んで、最適な要素分割データを選択し、f)基本形状、g)板厚・断面積を読み込んで節点座標を決定する。さらに、h)荷重を読み込んで、応力解析、振動解析、座屈解析、等に必要すべての入力データを作成する。図-2はそのようにして自動作成された解析モデルの一例を図示したものであるが、形状近似はきわめて良好である。主要部材のみについて、板厚、断面形状を与えており、補助部材についてはシステム側で適当に与えているため、解析結果は主要部材のみについてしか参照できないが、応力、変位、固有周期・モードの解析値は、測定値または他の詳細解析値と比べていずれもよ

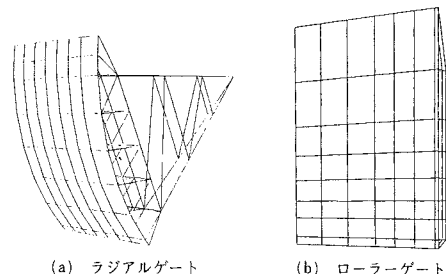


図-2 自動作成された解析モデルの一例

く一致することを確認している。また、ラジアルゲートの脚柱部の座屈荷重, 座屈モードについても同様である。

(2) 処理内容と手順

本システムは、データベースからのデータ入力および図形, 漢字出力部分に若干の機種依存部分が存在するが, 他はすべて標準の FORTRAN 77 レベルで書かれており, 約 20 000 ラインである。処理内容と手順は以下のとおりである。

1. 図形出力の表紙作成
2. データベースからデータ入力
3. 静的解析モデルの自動作成
作成した解析モデルの図形出力
4. 静水圧に対するゲートの静応力解析
スキンプレーットの静応力解析⁷⁾(ローラーゲートのみ)

解析結果のプリンター出力
解析結果の図形, 日本語出力

5. 地震時動水圧の算定
地震時動水圧に対するゲートの応力解析
解析結果のプリンター出力
解析結果の図形, 日本語出力
6. ゲートの質量, 水による付加質量算定
ゲートの固有値解析 (10 次まで)
固有周期のプリンター出力
固有周期, モードの図形出力

7. 脚柱の二次元座屈解析モデル作成(ラジアルのみ)
座屈解析 (固有値解析)
座屈荷重のプリンター出力
座屈荷重, モードの図形出力
8. 解析結果 (測定値に対応するもののみ) のデータベース側への出力

(3) 解析法の概要

- (i) 採用した要素
長方形シェル要素⁸⁾
三角形シェル要素⁹⁾(ローラーゲートの主桁変断面部のみ)
三次元はり要素
二次元はり要素 (ラジアルゲートの座屈解析のみ)
- (ii) 動水圧および付加質量の算定
ウェスターガードの式¹⁰⁾による。
- (iii) 固有振動解析
約 800 元の一般固有値問題のため, サブスペースイタレーションを採用
- (iv) 座屈解析
固有値解析 (べき乗法) による。

(4) 図形出力

解析結果の図形出力は,

- (i) 自動作成された解析モデル図
- (ii) 静水圧に対する応力解析結果 (変形図, 応力図)
- (iii) 動水圧に対する応力解析結果 (変形図, 応力図)

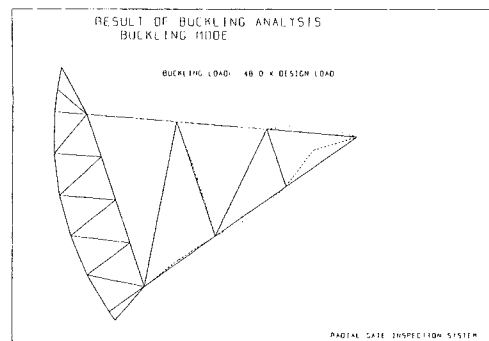
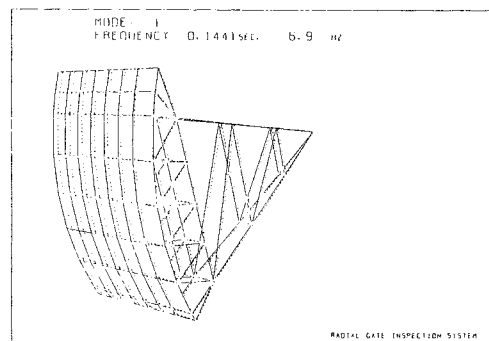
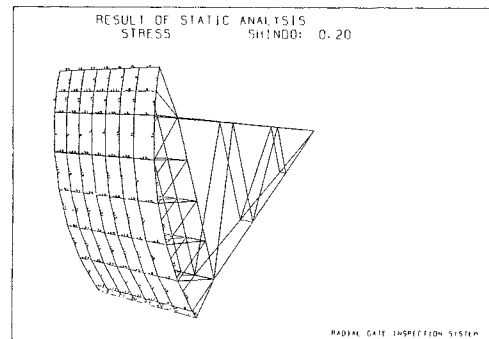
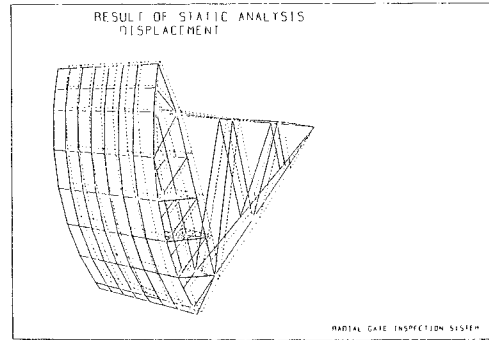


図-3 図形出力結果の一例

- (iv) 固有振動解析結果(1～5次の周期とモード図)
- (v) 座屈解析結果(ラジアルゲートのみ、座屈荷重と座屈モード図)

であり、立体図形はすべて陰線処理、遠近感処理が行われている(図-3)。

5. エキスパート・システム

水力鋼構造物に対する寿命予測機能を高度化していくためには、データベース・システム、簡易構造解析の諸機能に加えて、個々のゲートの特性を表わすには役立つが、統計量を計算しても意味のないデータ項目をも利用して、ゲートの安全性を総合的に判断できるシステムを開発する必要がある。たとえば、ゲートの外観状態に関するデータは、それぞれ良いから悪いまでの4つの値をとるだけなので、その平均値には意味がない。このようなデータを有効に利用するには、知識工学的アプローチが適当である。まず、本章では知識工学的手法の原理について簡単に解説し、ついで、著者らが開発したエキスパート・システムの機能と特徴について論じる。

(1) エキスパート・システムの概念^{11), 12)}

知識工学的手法に基づくシステム(これをエキスパート・システムということもある)は、人工知能研究の成果を応用して、従来ならば専門家でなければ解けなかったような高度な問題を自動的に解くプログラムである。エキスパート・システムは、医療診断や鉱物資源探査などの分野である程度の成功を取めたこと、また、わが国で第5世代計算機プロジェクトが進行していることなどがきっかけとなって、最近大きな注目を集めている¹³⁾。知識工学的手法に基づく具体的なシステムとしては、原子力プラントの運転支援システム¹⁴⁾や系統解析システム¹⁵⁾、また、土木・建築分野では、建築物の被害査定^{16), 17)}や保守管理のための意思決定支援システム^{18), 19)}などが知られている。

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。知識ベース、推論機構はそれぞれ従来の計算機利用技術のデータベース、プログラムに相当する。ただし、知識処理では、経験則などの判断基準を、コンピュータに不慣れた専門家にとっても比較的理解しやすい文字・記号情報の形で、そのまま柔軟に扱う。それに対し、従来のコンピュータ利用技術は、知識をいったん定量的な数値情報やプログラムに変換して、数値を中心とした処理を行う点が大きく異なる。

このため、経験の蓄積とともに変化し得る知識の追加・修正が従来のコンピュータシステムに比べてきわめ

て容易であり、高度かつ柔軟なシステムを逐次的に開発していくことができる。また、推論機構に少し工夫を加えるだけでコンピュータが行う推論プロセスを順次表示することができるので、分析している事象に対する利用者の理解を助け、その判断を確実にすることができる。

本エキスパート・システムは、すでに開発したデータベース・システムや、簡易解析システムと統合して、ダムゲートの安全性判断と余寿命予測に利用できる総合的システムとすることをめざしており、ダムゲートのデータベース・システム/簡易解析システムのフロントエンド・システムと位置づけることができる。すなわち、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る記号的な推論処理を行う。これにより、対象ゲートが現状のまま利用可能か、修理・取り替えを必要とするかの状況判定と、将来の余寿命予測とを自動化する。

(2) 構造物の寿命

寿命予測を目的としたシステムを構成するためには、構造物の寿命判定に対する考え方を整理しておく必要がある。一般的には、物理的、機能的、経済的寿命があるといわれるが²⁰⁾、個々の構造物でそれらに対するウェートの置き方も大きく異なる。ここでは、水力鋼構造物に対して、以下のような寿命に対する考え方を採用することにする。

- a) 構造力学的に検討した値が一定の基準値を越える場合。
 - ・変形が一定の基準値より大きく、かつ操作状態、漏水状態などが悪い。
 - ・主要部材に生じる応力が一定の基準値を越える。
- b) 構造力学的には問題ないが、外観状態がきわめて悪い場合。
- c) 構造力学的検討では問題ない結果を得たが、振動、片吊り等、操作状態がきわめて悪い場合。
- d) 構造力学的には問題ないが、経過年数が長く、過去のトラブル、管理者の信頼度、下流域への影響、水質などに問題ありと判断される場合。

(3) 寿命予測に伴うあいまい性の扱い

ダムゲートに関する測定結果や、簡易解析プログラムの出力結果は、定量的であり原則的にあいまい性を含まない性質のものである。それに対し、外観情報に関するデータは、観測者の主観に基づいている。これらを総合して、前節に述べたような立場から寿命予測を実施する場合は、それに伴って生ずるあいまい性をどのように考えるかを明らかにしておかなければならない。

エキスパート・システムであいまいな情報を取り扱う手法としては、医療診断システム MYCIN²¹⁾で採用された確実性係数 (certainty factor) がよく知られている。これは、各ルールごとに、その確からしさを表わす確実性係数 (ふつう、1 はルールが真と確信でき、-1 は偽と確信できるとし、その間の値でルールの確からしさを表わす) を付けておき、推論が進行するごとにこの値を利用して、推論結果全体の確からしさを推定する方法である。実際、建築物の被害査定システム^{16),17)}でも、これを拡張し、ファジィ推論 (fuzzy inference) システムにおいて、Dempster & Shafer の理論を利用している。

それに対し、本システムでは、主観的なデータ値に対して、個々のスコアを計算し、その重みつき平均を用いて総合的な判断を行うという方法をとった。これは次の理由によるものである。

- 寿命予測に用いる解析値、測定値は定量的なものであり、これらを利用するルールに確実性係数をつけるのは不適當である。
- 経験則に基づくルールにつける確実性係数の値を決定するのが難しい。
- 本システムでは、現在のところ診断に要する推論ステップ数はさほど多くない。したがって、MYCIN のように確実性係数を推論処理の制御に利用する必要はない。また、推論の根拠を提示するにも、もとのデータ値を本システムでどう評価したかをスコアの形で示した方がわかりやすい。

なお、スコアの計算は、計算用のテーブルを用いれば比較的容易に実現できるが、本システムでは、その変更容易性を増すために、前向き推論ルールとプログラム^①の形でこれを表現している。

(4) システムの機能構成

一般に、対象分野 (この場合ダムゲート) の機能や構成情報を積極的に利用して処理を行うエキスパート・システムを深い知識 (deep knowledge) に基づくシステム、また、推論処理に、主に、専門家の経験則のみを利用するエキスパート・システムを浅い知識 (Shallow knowledge) に基づくシステムという。

本エキスパート・システムでは、対象となる個々のダムゲートに関する知識をフレーム形式で保持する。そしてその内容をチェックするための経験則を前向き推論用のルールで、また、寿命診断に用いる経験則を後ろ向き推論用のルールで表現しているのが特徴である。この意味で、本システムは、浅い知識と深い知識とをうまく融合して扱っているといえよう。

図-4 に、本システムの機能構成図を示す。おのおのの機能は次のとおりである。

① データ変換プログラム

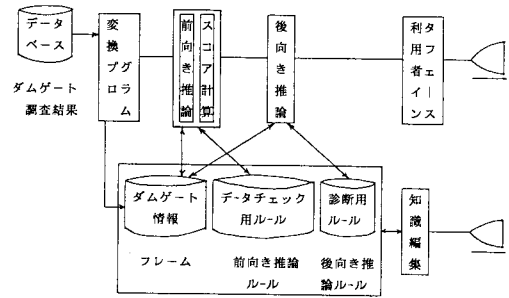


図-4 本システムの機能構成

ダムゲートの調査結果と簡易解析プログラムの出力結果を、指定したダムについて抽出して、それを後の処理で利用しやすいように変換するプログラムである。

② 知識ベース

①の出力結果であるダムゲート情報をもつフレーム、ならびにデータチェック用のルール、寿命診断用のルールの3つに知識ベースは分かれる。フレーム内の情報は、データチェック用ルールと③で述べる推論プログラムとによって適当に修正される。データチェック用ルールと診断用ルールは、主に著者らの知識に基づく経験則を集めたものである。これらは、本システムを利用・評価していく過程で逐次、追加・修正されていくという性質をもつ。

③ 前向き推論、スコア計算プログラム

データチェック用のルールを利用してフレーム情報を変更すると同時に、寿命予測に必要な各データ項目のスコアを計算する。

④ 後ろ向き推論プログラム

寿命診断用ルールを順次適用して、診断を行うプログラムである。推論の制御には通常の後ろ向き推論方式を用いる。

⑤ 利用者インタフェース

本システムの利用者からみえる機能である。④で処理する推論経過および結果を表示する機能、適用したルールを説明する機能をもつ。

⑥ 知識編集

本システムの開発者向けのインタフェースである。開発者はこの部分を利用して、知識ベースの改良作業、すなわち、フレーム構造の変更、ルールの追加・修正の作業を行う。

(5) ダムゲートデータのフレーム構造

本システムでは、ダムゲートのデータを表現するのに、(i) ゲートの概要ならびに構造形態に関する情報; (ii) ゲートを構成する部材に共通する物理的性質; (iii) ゲート各部材に特有な性質; (iv) 各項目に付随する特性値からスコアを導くための情報の4つのフレームを用いて

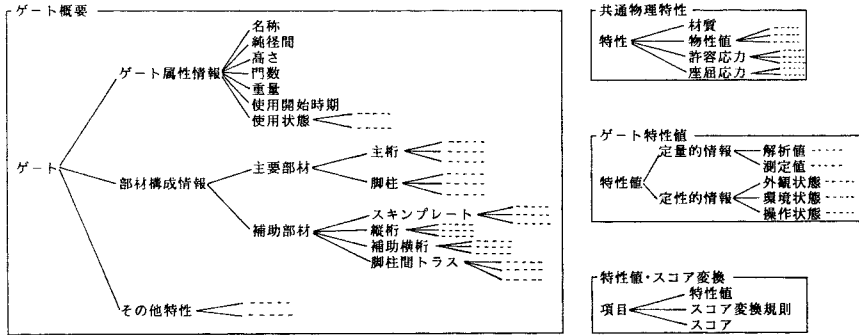


図-5 ダムゲートデータのフレーム構造の概要

いる。これらの構成は図-5に示すとおりである。

データのチェックを行うときには、システムはゲート概要フレームの部材構成情報とゲート特性フレームの定量的情報を参照する。スコアの計算処理は、ゲート概要フレームの部材構成情報、特性フレームの定性的情報、ならびに、特性値・スコア変換フレームを参照しながら行われる。診断処理の過程では、共通物理特性フレームとゲート構成情報、ならびに、特性値・スコア変換フレームのスコアの値が利用される。

(6) ルールの概要

現在のバージョンは、約60個の基本的なルールをもっている。これらのルールはフレーム情報を更新・参照しながら推論処理を行っている。以下では、本システムのルール例を示す。元のルールは、英語に近い表現をLISP言語で処理しやすいリスト形式で表現しているが、これを日本語に書き直して示す。

a) データチェック用ルール

データチェック用のルールは、入力データがフレーム構造に変換されると同時に起動される前向き推論ルールである。たとえば、次のルールが起動されると、ゲート特性値フレームの測定値データは、以後の処理で無効となる。なお、以下の例では、現在のところ閾値を0.3としている。

データチェック用ルール例：

もし、
 $|(\text{主要部材の解析値} - \text{測定値}) / \text{主要部材の解析値}|$ が
 閾値より大であり、

かつ、

物理的状态に相当する数値データのすべてに誤りがないことを、
 利用者が確認していれば、
 そのとき、

寿命予測には解析値を採用せよ。

このルールは実際には、ゲート概要フレームの部材構成情報を参照して、個々の部材に付随する特性値フレームを検索する。ルールのIF部に記述した計算を行い、

その結果に応じて、THEN部の処理を実行する。

b) スコア計算用ルール

スコア計算用のルールは、データチェック用ルールの適用がすべて終了した時点で自動的に起動される前向き推論ルールである。これは、構造計算結果の力学的検討を行うルール；ダムゲートの外観状態判定用ルール；操作状態判定用ルール；その他の寿命判定用ルールからなる。

ゲート概要フレームの部材構成情報に対応するゲート特性値の情報には、特性値・スコア変換フレームが付随している。そして、各項目の特性値に対して、スコア変換規則を適用することで、個々の部材のスコアを計算する。この計算方法は次のとおりである。

(i) 個々の項目に対するスコア計算

個々の定性的情報（“良い”から“かなり悪い”までの間の4段階）については、項目の重要度に応じた4つの値を割り振る。その値は専門家の経験則に基づいて定める。

外観状態判定用ルール例：

たとえば、個々の主桁の腐食状態については、

腐食状態が	良い場合	： 0
	おおむね良い場合	： -1
	良くない場合	： -2
	かなり悪い場合	： -3

となっている。変換規則は、それぞれ、特性値・スコア変換フレームの中にLISPプログラムとして書かれている。

(ii) 定量的情報のスコア計算

ルールに記述した方式で決定する。このルールも、データチェック用ルールと同様に、ゲート概要フレームの部材構成情報を参照して、個々の部材に付随する特性値フレームを検索する。

力学的検討ルール例：

このルールで定まるゲートの補修に関するスコアは、後で述べる診断ルールで使われる。

もし、
 主要部材の引張応力の解析値と測定値のうち、大きい方が許容引張応力より大で、
 かつ、
 降伏応力より小であれば、
 そのとき、
 ゲートの補修についてのスコア現在値から1減じよ。
 なお、操作状態に関するルール、その他の寿命診断ルールも、外観状態判定用ルールとほとんど同じ形式をもっている。

c) 寿命診断用のルール

寿命診断用のルールは、当該ダムゲートの現状における安全性を判定するためのルールと、その余寿命ならびに補修が必要になるまでの期間を推定するルールからなる。1つのゲートについて、この3種類のルールが順番に適用される。

安全性判定ルールは、当該ダムゲートが、

- ・現状のまま使用可能。
- ・補修が必要である。
- ・取り替えが必要である。

の3つのうちのどれであるかを判定するものであり、これらの仮説をもとに後ろ向き推論によって結論を出す。推論の過程では、前述の前向き推論の適用によって書き換えられたフレーム中のスコア情報を参照するので、実際に行われる推論ステップは、1, 2段という短いものとなる。

余寿命推定ルールは、当該ダムゲートの余寿命が、

- ・0～5年の間
- ・5～10年の間
- ・10～20年の間
- ・20～50年の間
- ・50年以上

のどれであるかを判定する。補修が必要になるまでの期間についても同様に、上の5つのいずれかを判定する。これらのルールも、安全性判定ルールと同様に、後ろ向きに実行される。

(7) 今後の課題

現在のシステムは、データベースおよび簡易解析計算システムからすべて必要な情報を人手でできることを前提として開発されている。しかし、実データの中には欠損値が含まれることも多い。今後は、欠損値があった場合にも、ある程度の診断ができるようにデータチェック用ルールを整備していくとともに、診断の精度を上げるべく、スコア計算ルールの改良、診断ルールの充実を図っていく考えである。

また、将来的には、これを拡張し、データベースや解析計算など深い知識を直接取り扱えるようにしていくこ

とが重要であろう。

6. 結 び

土木構造物の寿命予測技術という確立された技術が存在するわけではない。古い構造物の寿命予測は、一文をもって解決したり、数式を解くことですませられる問題ではなく、複雑であるが、今後さらに、このような問題が土木分野で重要になるとと思われる。

本論文は、著者らが具体的に水力鋼構造物（特にダムゲート）に焦点を絞り、最近の知識工学的手法を適用して、寿命予測へのアプローチを試みた結果を述べたものである。

公共性の高い土木構造物の寿命予測を考える場合、その備えるべき条件として、迅速、簡便、客観的でかつ、多くの人々の賛同が得られることが挙げられるであろう。従来、台帳に記載されていた事項、個別に安全性調査した結果、などが日本全国規模でのデータベースに組み込まれ、随時参照でき、エキスパートシステムによる判断あるいは推論による支援が受けられるなら、寿命予測精度が技術者一人の判断によるよりも飛躍的に高まることは確実である。少なくとも、個々の構造物の劣化度の進行状況を相対的に比較し、悪い順に順位づけすることは可能である。

知識工学的手法の適用を行うために、種々の判断ルールが検討されるならば、従来、専門家のみが何となく未整理のままもっていた知識・判断を明文化することができ、この手法の適用によって、専門家個人の能力の限界からくる制約を取り払い、また、多くの人々が異なる場所において、同一の判断能力を共有することが可能になるであろう。

本論文においては、水力鋼構造物を対象とした寿命予測手法の概要に重点を置いて述べたが、他の機会に、その適用結果を中心に報告する予定である。

参 考 文 献

- 1) 中村秀治・沼崎吉次・小林精一・加藤 治：実測結果から見たテンターゲートの静的構造特性について、土木学会論文報告集, No. 305, 1981年1月。
- 2) 中村秀治：昭和初期と30年代に建造されたラジアルゲートの構造上の比較, 検討, 電力土木, No. 182, 1983年1月。
- 3) 中村秀治・松井正一・松浦真一：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, 電力中央研究所報告, 研究報告 384039, 1985年4月。
- 4) 松浦真一・中村秀治・沼崎吉次・小林精一・加藤 治：水力鋼構造物の計測法の現状と表面腐食計測法の開発, 電力中央研究所報告, 研究報告 384038, 1985年5月。
- 5) 中村秀治・松井正一：ラジアルゲートの安全性調査, 判定に関する電算機システムの開発, 電力土木, No. 191, 1984年7月。

- 6) 中村秀治・松井正一・松浦真一・沼崎古次：ローラーゲートの安全性調査，判定に関する電算機システムの開発，電力中央研究所報告，研究報告 384040，1985年3月。
- 7) 中村秀治：ローラーゲートのスキンプレート表面に生じる応力値について，電力土木，No.180，1982年9月。
- 8) Zienkiewicz, O.C. and Holister, G.S. : Stress Analysis, John Wiley, 1965.
- 9) Holand, I. and Bell, K. : Finite Element Methods in Stress Analysis, TAPIR, ; 川井忠彦訳：有限要素法—応力解析への応用，朝倉書店，1972年。
- 10) 水門鉄管協会：水門鉄管技術基準，1981年。
- 11) 寺野隆雄・松井正一・原田 実・大屋隆生・鈴木道夫：知識処理技術の動向，電力中央研究所報告，調査報告 583002，1984年1月。
- 12) Hayes-Roth, F., Waterman, D.A. and Lenat, D.B. (eds.) : Building Expert Systems, Addison-Wesley, 1983.
- 13) 井原廣一：知識工学の産業界への応用，電気学会雑誌，Vol.103, No. 3, 1983.
- 14) 木口高志・吉田健一・元田 浩・小林節雄：知識工学を適用したプラント運転ガイダンス方式の開発，日本原子力学会誌，Vol.25, No.4, 1983.
- 15) 河野良之・藤原良一・坂口敏明・鈴木 浩：電子系統解析支援エキスパートシステムの開発，電気学会論文誌 B, Vol.105, No.8, 1985.
- 16) 石塚 満：建築物被害査定のエクスパート・システム，情報処理，Vol.24, No.3, 1983.
- 17) 古田 均, Fu, K.-S. and Yao, J.T.P. : 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，Vol.70, 1985.9.
- 18) 福田取一：構造健全性確保への知識工学的接近の試み，日本機械学会論文集，第452号A編，1984年4月。
- 19) 福田取一・元岡 達：構造物保守管理のための意志決定支援システムの開発，日本機械学会論文集，第465号A編，1985年5月。
- 20) 榎本 守：土木構造物の寿命とは何か，土木学会誌，Vol.70, 1985.8.
- 21) Shortliffe, E.D. : Computer-Based Medical Consultation : MYCIN, Elsevier, 1976.
- 22) 黒川利明：電子計算機のプログラミング，LISP入門，培風館，1983.

(1985.9.30・受付)