

鋼道路橋の疲労亀裂に関するルールとフレームによる知識ベース・エキスパートシステム

KNOWLEDGE-BASED EXPERT SYSTEM FOR ASSESSMENT OF FATIGUE DAMAGES
ON STEEL HIGHWAY BRIDGES USING RULE AND FRAME REPRESENTATIONS

三上 市藏* 三木 千壽** 田中 成典***

By Ichizou MIKAMI, Chitoshi MIKI, and Shigenori TANAKA

A knowledge-based expert system is constructed to refer to the past fatigue damages appeared at various parts of steel highway bridges, and is able to assist engineers's judgement. The system consists of three subsystems : presenting the list of parts to be inspected, appraising the grade of fatigue damages, and proposing the methods of retrofit. The knowledge for fatigue damages is represented by using both the rules and the frame-works. An expert shell, called Super-BRAINS, and UTI LISP language are used. An example problem is interred to illustrate and demonstrate the expert system developed herein.

1. まえがき

土木工学分野においては、構造物を新しく建設するよりも、既存のものを維持・管理・補修することに重点が移りつつあり、土木構造物の保全管理業務の重要さが増してきている。しかし、これら保全管理業務は、予算や人員の制約を受け、必要な知識はきわめて複雑で、多岐にわたる。点検作業は、少数のエキスパートと呼ばれる高度な知識を有する経験者の能力に頼っている。また、損傷度の判定、補修時期や補修方法の決定に困難なことが多く、担当者の知識に委ねられることが多い。^{1) - 4)}

従来、わが国では、道路橋は疲労の影響を受けないものとされてきた。⁵⁾ しかし、近年、疲労が原因であると考えられる亀裂の発生が見受けられる。⁶⁾ 幸いに、わが国では、大事故につながったような疲労損傷事例は未だ生じてないが、外国では幾つか報告されている。^{7) - 13)}

一般に疲労の特性として、疲労亀裂が発生してから危険な状態にまで進展するには、かなりの時間を要するので、疲労亀裂を発見しても早急に補修する必要はない。また、ある程度で進展が止まるものもあり、進展状況をそのまま観察する方が良い場合もある。¹⁾ もちろん、亀裂を見落とし、放置すれば事故に至ることはあり得る。亀裂進展の速度は、種々の要素で異なり、調査基準を一律に決定することは不可能であり、他

* 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564 吹田市山手町3丁目3番35号)

** 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152 目黒区大岡山2丁目12番1号)

*** 工修 ㈱東洋情報システム東京本社 (〒105 港区新橋1丁目11番7号); 元関西大学大学院

の条件を考慮して検討する必要がある。¹⁴⁾したがって、鋼橋の維持管理に従事する技術者が疲労に関する正しい知識を持つことは重要である。^{15) 16)}

近年、土木工学分野に対するエキスパート・システム(Expert System: 以下、E Sと略記)の適用^{17) 18)}もずいぶんなされており、米国ではすでに実用システムとして稼働しているものもある。¹⁹⁾日本でも、ここ2～3年の間に、土木工学分野におけるE Sの研究・開発が精力的に実施されるようになってきた。本研究では、鋼道路橋の疲労亀裂の点検から補修方法選定に至るE Sを構築した。疲労亀裂の点検基準、損傷要因と作用力の推定法、補修方法に関する基準は少ないため、過去の損傷事例^{5) 7) -12) 20) -22)}を収集し、知識として整理し、構造化したデータとして蓄えた。推論には、これらデータを参照し、一致したものを推論結果とするマッチングによる方法を採用した。ただし、補修方法の実例については適切であったかどうか結論がでていないものが多い。

本研究で使用した損傷事例とほぼ同じものを用いて、文献22)ではデータベースが構築されている。データベースは、情報の存在の項目を知っていて、詳しい情報を探すときに有効な手段である。しかし、E Sにおけるマッチング手法による場合、知識の構造を知る必要はなく、エキスパートの知識に基づいてシステムが発する端末からの問い掛けに即答していただくだけで、知りたい情報に導かれる。

構築したE Sは、大きく3つに分けられる。まず、橋梁の基本事項から点検箇所のリストを提示する。次に、損傷構造などから損傷要因と作用力を推定する。最後に、損傷要因などから補修方法を選定する。これら、3本のプログラムを順次実行することにより、マッチングにより事例がリストアップされ、推論結果となる。

E Sを構築するにあたり、エキスパート・シェルとしてSuper-BRAINS²³⁾を使用した。また、UTI LISP²⁴⁾を用いて Super-BRAINS で記述不可能な点を補った。

2. エキスパート・シェルの概要

本研究では、シェル Super-BRAINS を使い、推論方法としてはプロダクション型とフレーム型を適用した。一般にプロダクション・ルールの推論機構はいくつかの欠点を持つ。²⁵⁾例えば、ルールが適用される推論状況が明確に表現されないの、ルールを適用する目的・理由が分からない、E S利用者への質問の順序を制御したり、関連質問を集中したりできない、などである。これに対して、フレームは人間の記憶構造や推論を理解するために、1975年、Minskyによって提案されたもので、知識に構造を持たせることを目指しており、典型的な知識や階層的にまとめられた知識の表現に適している。²⁶⁾フレームはプロダクション・ルール、意味ネット、述語論理をすべて含有した概念であり、したがって、プロダクション・ルールもフレームで表現することは、原理的には可能であるといわれる。²⁷⁾

フレームは、フレーム名と1つ以上のスロット(slot)から構成される。フレーム名は識別のために用い、スロットはフレームの性質を記述したり、属性の継承を行うために用いる。そのため、知識表現を省力化することが可能である。例えば、フレーム

*FRAME 損傷が予想される点検リスト(1)	
@構造形式	" 単純橋 "
@桁形式	" ランガー "
@平面形	" 直橋 "
@点検箇所	" 吊材と補剛桁の連結部 "

には、4つのスロット(構造形式、桁形式、平面形、点検箇所)がある。このスロットはフレームの性質を表現している。スロットにはシステムで用意された特別の意味を持つシステム・スロットとユーザが自由に

定義できるユーザ・スロットがある。この例では構造形式、桁形式、平面形、点検箇所がユーザ・スロットである。

3. 疲労損傷事例の収集と知識の整理

ESの対象として、鋼道路橋（桁橋、トラス橋、アーチ橋およびラーメン橋）上部構造の溶接構造に発生する疲労亀裂を選んだ。

（1）疲労損傷事例の整理

過去の損傷事例を文献²¹⁾²²⁾に基づき、他の文献⁵⁾⁷⁾¹²⁾²⁰⁾も参照しながら、90ケース収集した。結果は表-1のように整理した。

橋梁の基本項目として、「構造形式」、「桁形式」、「平面形」を考え、それぞれ、表-2～表-4に示す項目を使って記述した。

疲労損傷の場所に関する情報は、「損傷構造」、「損傷部分」、「溶接種類」、「継手種類」、「損傷要素」に分けて整理した。まず、疲労亀裂の発生場所（表-5）をスケルトンとして「損傷構造」欄に記述し、そこで接合されている2つの要素（表-6）を「損傷部分」欄で、接合に採用されている溶接の種類（表-7）を「溶接種類」欄で、損傷部分の継手構造（表-8）を「継手種類」欄で明示し、損傷部分の要素のうち疲労亀裂が発生している当該要素（表-9）を「損傷要素」欄で特定する。

次に、損傷要因を作用力など外的要因から表-10のように分類して、これを「損傷要因 レベル1」欄に記述した。さらに、応力のレベルからみた損傷要因を表-11のように分類して、「損傷要因 レベル2」欄に示した。疲労亀裂の原因となる損傷部分に作用する力²²⁾として図-1のものを考え、表-12の項目を「作用力」欄に記述した。この作用力によって発生する亀裂の様式は図-1の(a)～(l)のものが考えられ、これを表-13の項目を使って「亀裂様式」欄に書いた。そして、亀裂の方向を表-14の項目を使って「亀裂方向」欄に、実際に実施された補修の方法を表-15の項目を使って「補修方法」欄に、それぞれ記入し、損傷の詳細な状況を補足的に「損傷状況」欄に記入した。

その他、当該橋梁の架設時期と、架設から疲労亀裂発見までの年数をそれぞれ「架設年度」欄と「発見年数」欄に記入した。「備考」にはその他のメモを書き、参考文献番号と参照ページまたは参照番号を示した。

（2）点検から補修に至る流れ

維持管理業務に携わる技術者は過去の自分の経験、すなわち、どのような情報で何を解析し、どこを点検し、どのように判断したか、の知識に基づいて、新しい事態を判断することが多い。この判断のプロセスをESとして構築することを目指す。そこで、鋼道路橋の疲労損傷に関する点検から補修に至る維持管理業務の流れを図-2のように考え、このうち、網掛け部分を3つのESとして構築する。

第1のESでは、構造形式（表-2）、桁形式（表-3）、平面形（表-4）から、該当する損傷事例にみられる損傷構造（表-5）を捜し出し、これを点検すべき構造部分として表-5の項目を使ってリストアップする。

第2のESでは、このリストに基づいて点検・調査を行い、損傷が発見された場合、損傷構造（表-5）、損傷部分（表-6）、溶接種類（表-7）、継手種類（表-8）、損傷要素（表-9）を入力して、損傷要因（表-10、表-11）と作用力（表-12）を推定する。

第3のESでは、補修の必要性がある場合、推定結果の損傷要因と作用力と、別の情報、亀裂様式（表-13）、亀裂方向（表-14）から、補修方法（表-15）が選定される。補修の必要性を判定するには、損傷程度が重要な因子となるが、損傷程度の判定に関して広く認められている知識がないため、今回は省略した。経年も、損傷程度と密接な関係があるが、的確な知識が得られないので、取り入れなかった。

以下に、3つのESを説明する。

表-1 鋼道路橋の疲労損傷事例

番号	橋梁名 (国名)	構造形式	桁形式	平面形	損傷構造	損傷部分	溶接種類	継手種類	損傷要素	損傷要因	
										レベル1	レベル2
1)	橋梁名不明 (日本)	単純橋	ランガー	直橋	吊材と補脚桁の 連結部	ガセットプレート 補脚桁上フランジ	隅肉溶接	T継手	補脚桁上フランジ	風による振動	応力集中
2)	橋梁名不明 (日本)	単純橋	ランガー	直橋	吊材端部	吊材腹板 吊材フランジ	隅肉溶接	T継手	吊材腹板	風による振動	応力集中
3)	橋梁名不明 (日本)	連続橋	上路アーチ	直橋	支材と補脚桁の 連結部	補脚桁腹板 補脚桁下フランジ	隅肉溶接	T継手	補脚桁腹板	活荷重の作用 ディテールの不適性	2次応力
4)	橋梁名不明 (日本)	単純橋	上路アーチ	直橋	支材と補脚桁の 連結部	ガセットプレート 補脚桁下フランジ	隅肉溶接	T継手	ガセットプレート	ディテールの不適性	2次応力

87)	BELLE FOURC RE RIVER BR- IDGE (米国)	連続橋	合成箱桁	直橋	ダイヤフラムと 主桁の連結部	主桁腹板 垂直補脚材	隅肉溶接	T継手	隅肉溶接	ディテールの不適性	2次応力の 応力集中
88)	BELLE FOURC RE RIVER BR- IDGE (米国)	連続橋	合成箱桁	直橋	ダイヤフラムと 主桁の連結部	主桁上フランジ 垂直補脚材	隅肉溶接	T継手	隅肉溶接	ディテールの不適性	2次応力の 応力集中
89)	国道2号線 鳳下橋 (日本)	単純橋	ランガー	直橋	吊材と補脚桁の 連結部	ガセットプレート 補脚桁上フランジ	隅肉溶接	T継手	補脚桁上フランジ	風による振動	応力集中
90)	BRIDGE 51.5 WINDSOR DIVISION	単純橋	プレート ガーダー	直橋	縦桁と横桁の交差部	縦桁下フランジ 横桁腹板	隅肉溶接	T継手	縦桁下フランジ	2次的変形	2次応力の 応力集中

表-2 構造形式 (事象-1) 表-6 損傷部分 (事象-5) 表-9 損傷要素 (事象-8) 表-13 亀裂様式 (事象-12)

・単純橋	(24)
・連続橋	(44)
・ゲルバー橋	(1)

表-3 桁形式 (事象-2)

・プレートガーダー	(18)
・格子プレートガーダー	(13)
・箱桁	(6)
・合成桁	(24)
・合成箱桁	(3)
・トラス	(1)
・上路アーチ	(3)
・中略アーチ	(1)
・タイドアーチ	(3)
・ランガー	(4)
・フィレンデル橋のトラス	(1)
・ローゼ橋の補脚トラス	(1)
・ラーメン橋の合成桁	(1)

表-4 平面形 (事象-3)

・直橋	(90)
・斜橋	(3)
・曲線橋	(7)

表-5 損傷構造 (仮説-1/事象-4)

・横桁と主桁の連結部	(25)
・横桁と主桁の交差部	(3)
・対横橋と主桁の連結部	(16)
・横橋と主桁の連結部	(3)
・吊材と主桁の連結部	(1)
・ダイヤフラムと主桁の連結部	(9)
・主桁のカバープレート取り付け部	(3)
・主桁の欠き部	(5)
・主桁の継手	(6)
・主桁の支点部	(3)
・横橋と補脚桁の連結部	(1)
・アーチリブと横桁の連結部	(2)
・縦桁と横桁の交差部	(1)
・吊材と補脚桁の連結部	(2)
・支材と補脚桁の連結部	(2)
・対横橋と補脚桁の連結部	(1)
・吊材端部	(2)
・支材とアーチリブの連結部	(1)
・垂直補脚材と主桁の取り付け部	(2)
・タイ材の継手	(1)

主桁	
・主桁腹板	(43)
・主桁フランジ	(5)
・主桁上フランジ	(20)
・主桁下フランジ	(8)

横桁	
・横桁	(1)
・横桁腹板	(5)
・横桁フランジ	(6)
・横桁上フランジ	(1)
・横桁下フランジ	(1)

縦桁	
・縦桁下フランジ	(1)

補脚桁	
・補脚桁腹板	(1)
・補脚桁上フランジ	(2)
・補脚桁下フランジ	(2)

補脚材	
・垂直補脚材	(43)
・水平補脚材	(2)
・ダイヤフラムフランジ	(2)
・ダイヤフラム腹板	(2)

アーチリブ	
・アーチリブ	(2)
・アーチリブ腹板	(1)

吊材	
・吊材腹板	(2)
・吊材フランジ	(2)

付属プレート	
・ガセットプレート	(8)
・カバープレート	(3)
・タイプレート	(1)
・ピンプレート	(1)

表-7 溶接種類 (事象-6)

・隅肉溶接	(73)
・グループ溶接	(10)
・溶接なし	(7)

表-8 継手種類 (事象-7)

・T継手	(79)
・突合せ継手	(7)
・片面添接継手	(4)

・主桁腹板	(35)
・主桁下フランジ	(1)
・横桁腹板	(3)
・縦桁下フランジ	(1)
・補脚桁腹板	(1)
・補脚桁上フランジ	(2)
・アーチリブ	(1)
・アーチリブ腹板	(1)
・吊材腹板	(2)
・垂直補脚材	(8)
・ダイヤフラム腹板	(2)
・ガセットプレート	(4)
・隅肉溶接	(23)
・グループ溶接	(6)

表-10 損傷要因レベル1 (仮説-2/事象-9)

荷重等	
・風による振動	(4)
・活荷重の作用	(20)
・地震による振動	(1)
・気温	(2)

設計・構造上	
・横力配作用	(17)
・ディテールの不適性	(40)
・2次的変形	(4)

製作・施工上	
・材質不良	(4)
・溶接不良	(16)
・製作誤差	(1)
・輸送架設荷重	(2)

表-11 損傷要因レベル2 (仮説-3/事象-10)

・応力集中	(20)
・2次応力の応力集中	(34)
・2次応力	(25)
・応力集中による産生2次応力	(5)
・残留応力	(3)
・レベル2不明	(3)

表-12 作用力 (仮説-4/事象-11)

T継手の作用力 ①~①	(79)
突合せ継手の作用力 ②~②	(6)
片面添接継手の作用力 ③~③	(3)
作用力不明	(2)

・T継手の亀裂様式 (a)~(f)	(72)
・突合せ継手の亀裂様式 (g)~(h)	(6)
・片面添接継手の亀裂様式 (i)~(l)	(3)

表-14 亀裂方向 (事象-13)

・溶接に垂直な亀裂	(19)
・溶接に平行な亀裂	(57)
・垂直な亀裂	(2)
・斜め下方に亀裂	(11)

表-15 補修方法 (仮説-5)

・ストップホール	(44)
・ガウジング	(11)
・グラインダ	(24)
・ピーニング	(4)
・腹板ギャップ増大	(4)
・腹板厚の増大	(1)
・切り抜き	(1)
・再溶接	(33)
・フランジと補脚材を溶接	(5)
・再溶接	(1)
・補脚材付き添接板	(31)
・高力ボルト	(22)
・添接板	(22)
・挿入板	(1)
・ケーブルによる吊材相互の緊結	(2)
・横桁と主桁のフランジ連結	(3)
・対横橋と主桁のフランジ連結	(3)
・ダイヤフラムと主桁のフランジ連結	(1)
・横桁とアーチリブのフランジ連結	(1)
・縦桁支承の交換	(1)
・主桁の交換	(1)
・連結板の交換	(1)
・新補脚材の設置	(1)
・新縦梁の設置	(1)
・板支柱の設置 (補修検討中)	(1)
・腐蝕	(2)
・補修方法不明	(23)

4. 点検リスト提示システム

鋼道路橋の点検の間隔や実施体制などは、橋梁の所轄機関によってまちまちであるが、点検・調査は日常点検、定期点検、変状調査の3種類に分類できる。しかし、亀裂損傷が発生しやすい場所を、重点的に点検するように示唆する点検システムはできていないようである。ここでは、疲労損傷が発生しているのではないかと思われる箇所を示す点検リストを提示するESを考える。

(1) システムの構築

表-1の各事例について、構造形式、桁形式、平面形、点検箇所(損傷構造)をスロットとして、フレームを知識ベース中に記述した。このフレームは「損傷が予想される点検リストのフレーム」と名付けられ、90個ある(図-4参照)。

ESは図-3に示すようなルールの流れとして構成した。すなわち、事象-1(構造形式)、事象-2

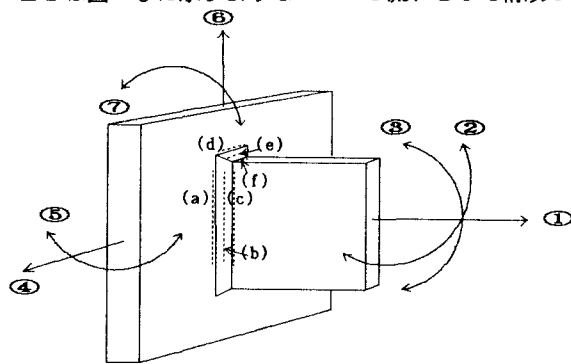


図-1 (a) T継手の作用力と亀裂様式

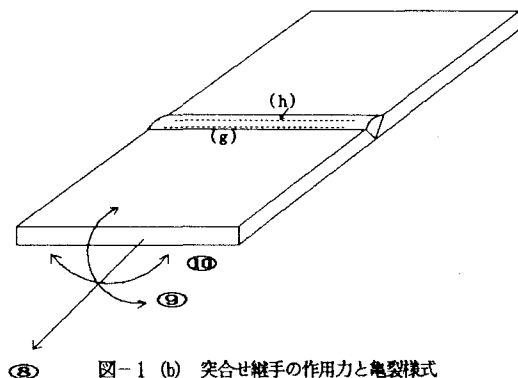


図-1 (b) 突合せ継手の作用力と亀裂様式

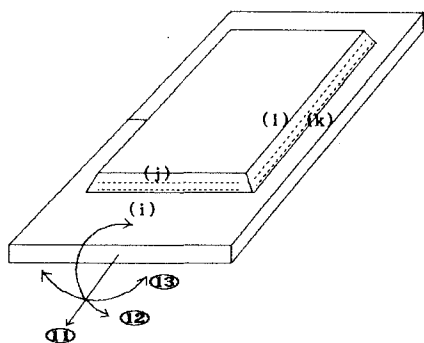


図-1 (c) 片面添接継手の作用力と亀裂様式

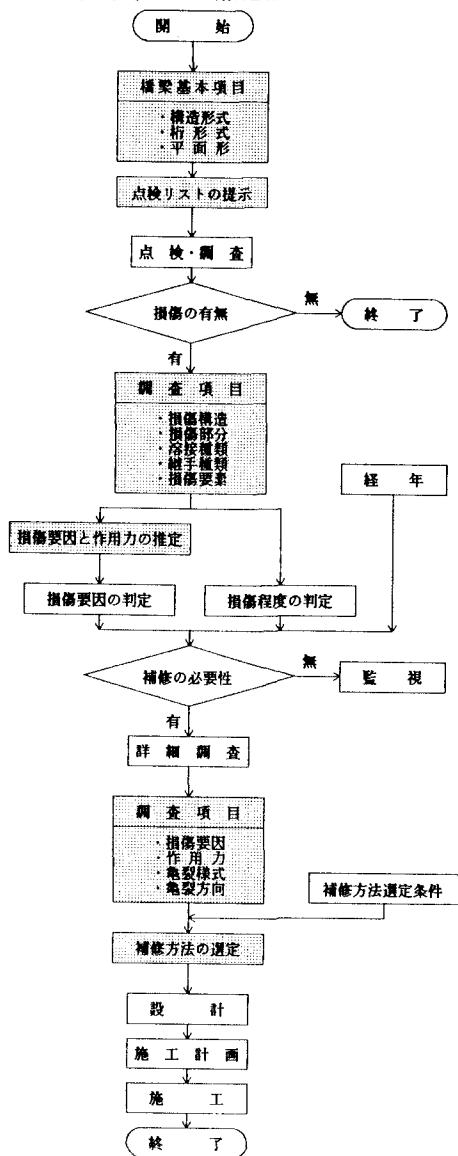


図-2 鉄道路橋の疲労損傷に関する点検から補修までの流れ

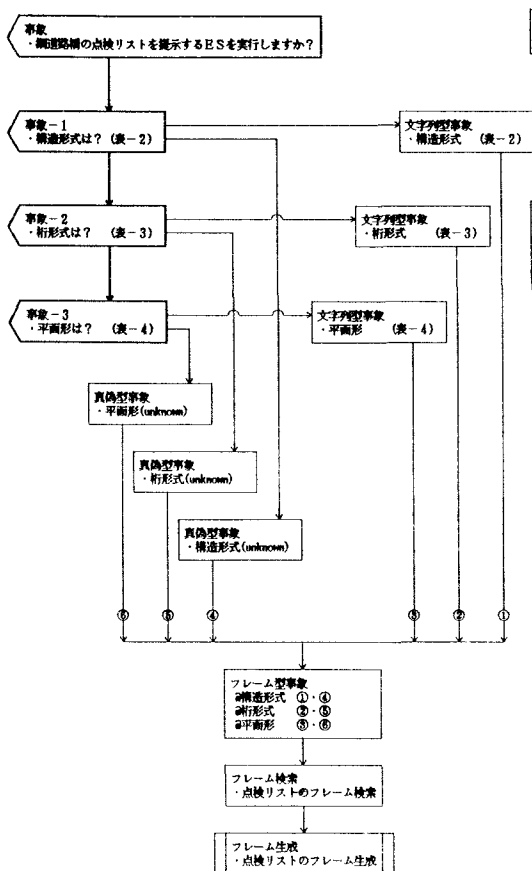


図-3 点検リスト提示システムにおけるルールの流れ

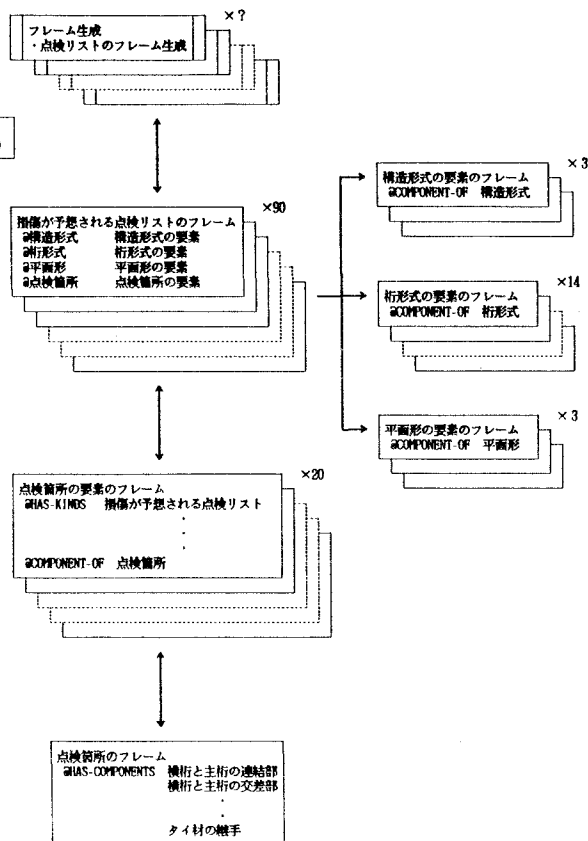


図-4 点検リスト提示システムにおけるフレームの流れ

(桁形式)、事象-3 (平面形) の要素に対して、事例をマッチングして、亀裂発生が予想される損傷構造のリストを点検リスト (仮説-1) のフレームとして生成する。

ここで、文字列型事象は、事象-1～事象-3の要素を文字列として評価し、文字列そのものをフレーム型事象にセットする役目がある。また、真偽型事象は、事象-1～事象-3に対して要素を特定できない場合、unknown をフレーム型事象にセットする役目がある。例えば、事象-1で"U"を答えると、フレーム型事象が、表-1の事例フレームの構造形式のスロット"単純橋"、"連続橋"、"ゲルバー橋"のどれに対しても、マッチしたものとみなされる。この文字列型事象と真偽型事象は画面に表示されることなく、中間事象として使用され、フレーム型事象が作成される。そして、表-1の事例フレームを検索し、このフレーム型事象にマッチングしたものに対してフレームを生成させ、メッセージを画面に表示する。ただし、事象フレームの検索を行うにはシェルは機能不足のため、UTI LISP関数を用いて直接記述した。

次に、フレーム生成のメッセージから、生成されたフレームを参照していく手順を図-4に示す。生成されるフレームの個数は"x?"と表示されているが、最大90個である。図中、" $\longleftrightarrow$ "印は、相互のフレームを参照できること、すなわち、深く知識を参照できることを示す。" $\longrightarrow$ "印はその方向にのみフレームを参照できることを示す。この参照は、シェルが保持しているコンサルテーション・メニューを介して行う。

フレーム参照の主要な関係は、「フレーム生成」 $\longleftrightarrow$ 「損傷が予想される点検リストのフレーム」 $\longleftrightarrow$ 「点検箇所の要素のフレーム」である。生成されたフレームから、「損傷が予想される点検リストのフレー

鋼道路橋の点検リストを提示するESを実行しますか？
YES-NO => Y

構造形式は？
1 単純橋
2 連続橋
3 ゲルバー橋
CHOOSE ONE => 1

桁形式は？
1 プレートガーダー
2 格子プレートガーダー
3 箱桁
4 合成桁
5 合成箱桁
6 トラス
7 上路アーチ
8 中路アーチ
9 タイドアーチ
10 ランガー
11 フィンデール橋のトラス
12 ローゼ橋の補剛トラス
13 ラーメン橋の合成桁
CHOOSE ONE => 10

平面形は？
1 直橋
2 斜橋
3 曲線橋
CHOOSE ONE => 1

*FRAME 損傷が予想される点検リスト (1)
a構造形式 単純橋
a桁形式 ランガー橋
a平面形 直橋
a点検箇所 吊材と補剛桁の連結部

*FRAME 損傷が予想される点検リスト (2)
a構造形式 単純橋
a桁形式 ランガー橋
a平面形 直橋
a点検箇所 吊材端部

*FRAME 損傷が予想される点検リスト (61)
a構造形式 単純橋
a桁形式 ランガー橋
a平面形 直橋
a点検箇所 吊材と主桁の連結部

*FRAME 損傷が予想される点検リスト (89)
a構造形式 単純橋
a桁形式 ランガー橋
a平面形 直橋
a点検箇所 吊材と補剛桁の連結部

*FRAME 吊材と補剛桁の連結部
aHAS-KINDS 損傷が予想される点検リスト (1)
aCOMPONENT-OF 損傷が予想される点検リスト (89)
a点検箇所

(a) 吊材と補剛桁の連結部

*FRAME 吊材端部
aHAS-KINDS 損傷が予想される点検リスト (2)
aCOMPONENT-OF 損傷が予想される点検リスト (80)
a点検箇所

(b) 吊材端部

*FRAME 吊材と主桁の連結部
aHAS-KINDS 損傷が予想される点検リスト (61)
aCOMPONENT-OF 点検箇所

(c) 吊材と主桁の連結部

図-6 点検箇所の情報：ケース(A)

図-7 点検箇所のフレーム参照例：ケース(A)

図-5 点検リスト提示システムの推論実行例：ケース(A)

「構造形式の要素のフレーム」、「桁形式の要素のフレーム」、「平面形の要素のフレーム」、「点検箇所のフレーム」は表-2～表-5の項目を調べるのに利用できる。

(2) 推論実行例

ケース(A)として、図-5に推論実行過程の画面を示す。初めに、「鋼道路橋の点検リストを提示するESを実行しますか？」の問いに対して「Y」を入力する。

「構造形式は？」の問いに「単純橋」を選ぶ。「桁形式は？」に対して「ランガー」を、「平面形は？」に対して「直橋」を選択する。

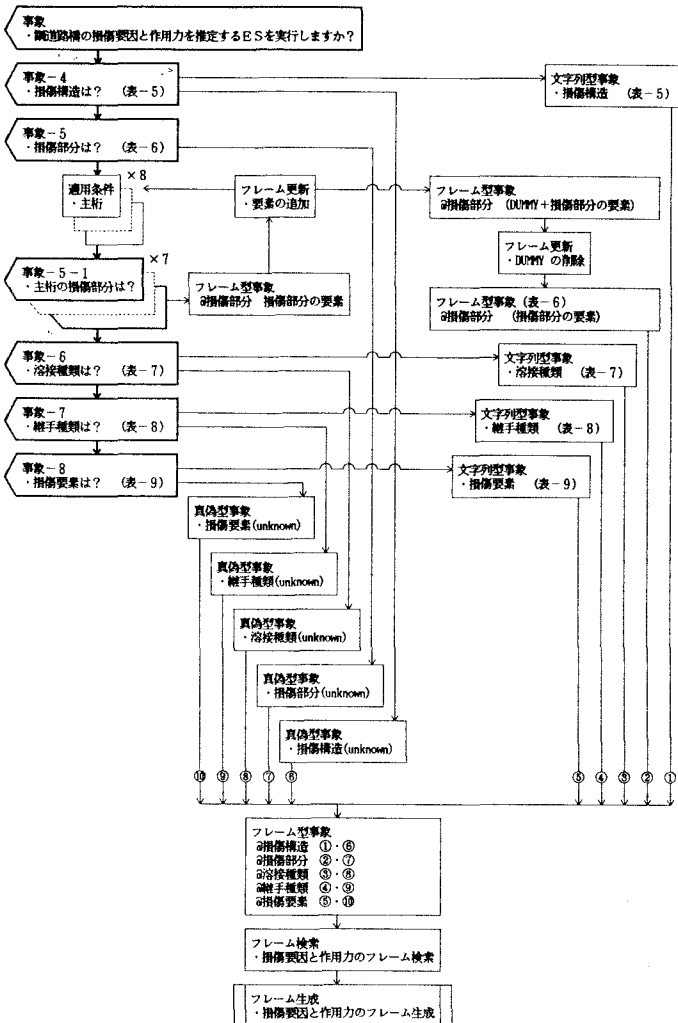


図-8 損傷要因と作用力の推定システムにおけるルールの流れ

このあと、ルールを用いた推論が実行

されて、該当する「点検箇所」のフレームがいくつか生成され、その旨のメッセージが表示される。シェルが保持しているコンサルテーション・メニューを用いて、生成されたフレームを参照すると図-6に示すように、事例の中から抽出された該当する「点検箇所」を知ることができる。図中、「損傷が予想される点検リスト」には事例番号が付けられている。この場合、(1)と(89)は点検箇所の要素が同じであり、結局、「吊材と補剛桁の連結部」、「吊材端部」、「吊材と主桁の連結部」が推論結果として得られた点検箇所である。

ここで、フレームの流れに沿って、各点検箇所のフレームを参照すると図-7のように表示される。例えば図(a)では、点検箇所の要素「吊材と補剛桁の連結部」のフレームが「損傷が予想される点検リスト(1)」と「同(89)」というフレームに属していることが表示されている。図(b)では、「損傷が予想される点検リスト(80)」が点検箇所の要素「吊材端部」を持っていることが表示されているが、これはルールによってマッチングされたものではない。このように、マッチングされなかったが、点検箇所の当該要素を持っている事例を拾い出すことができる。

5. 損傷要因と作用力の推論システム

点検リストに基づいて点検・調査を行い、損傷が見うけられた場合、5つの調査項目、すなわち、損傷構造、損傷部分、溶接種類、継手種類、損傷要素から損傷要因レベル1、損傷要因レベル2、作用力を推定するESを考える。

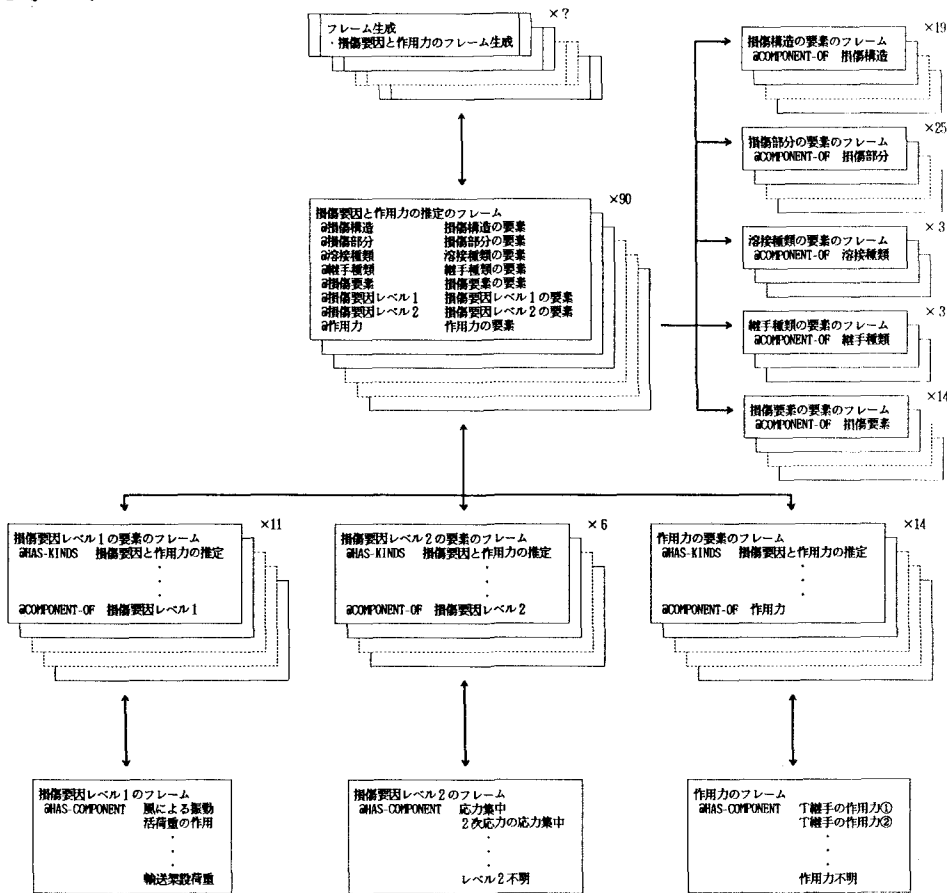


図-9 損傷要因と作用力の推定システムにおけるフレームの流れ

(1) システムの構築

表-1の各事例について、損傷構造、損傷部分、溶接種類、継手種類、損傷要素、損傷要因レベル1、損傷要因レベル2、作用力をスロットとして、フレームを知識ベース中に記述した。ただし、損傷部分（表-6）の要素については広い知識となるように、例えば、主桁フランジは主桁上フランジと主桁下フランジを含むと解釈する。

ESは図-8に示すようなルールの流れとして構成した。すなわち、事象-4（損傷構造）、事象-5（損傷部分）、事象-6（溶接種類）、事象-7（継手種類）、事象-8（損傷要素）の要素に対して、事例をマッチングして、損傷要因レベル1（仮説-2）と損傷要因レベル2（仮説-3）をフレームとして生

継ぎ手の損傷要因と作用力を推定する
ESを実行しますか？
YES-NO => 1

損傷構造は？

- 1 橋桁と主桁の連結部
- 2 橋桁と主桁の交差部
- 3 対横橋と主桁の連結部
- 4 横橋と主桁の連結部
- 5 吊材と主桁の連結部
- 6 ダイアフラムと主桁の連結部
- 7 主桁のカバープレート取り付け部
- 8 主桁切欠き部
- 9 主桁の端手
- 10 主桁の支点部
- 11 橋桁と補脚桁の連結部
- 12 アーチリブと橋桁の交差部
- 13 補脚桁と橋桁の交差部
- 14 吊材と補脚桁の連結部
- 15 支材と補脚桁の連結部
- 16 対横橋と補脚桁の連結部
- 17 吊材端部
- 18 支材とアーチリブの連結部
- 19 垂直補脚材と主桁の取り付け部
- 20 タイ材の端手

CHOOSE ONE => 14

*FRAME 損傷要因と作用力の推定 (1)

①損傷構造 吊材と補脚桁の連結部

②損傷部分 ガセットプレート
補脚桁上フランジ

③溶接種類 隅肉溶接

④継手種類 T継手

⑤損傷要素 補脚桁上フランジ

⑥損傷要因レベル1 風による振動

⑦損傷要因レベル2 応力集中

⑧作用力 T継手の作用力④

*FRAME 応力集中

⑧AS-KINDS 損傷要因と作用力の推定 (1)

①損傷構造 主桁の端手

②損傷部分 主桁フランジ

③溶接種類 グループ溶接

④継手種類 実合せ継手

⑤損傷要素 グループ溶接

⑥損傷要因レベル1 溶接不良

⑦損傷要因レベル2 応力集中

⑧作用力 T継手の作用力④

図-11 損傷要因と作用力の情報：ケース(B)

図-15 損傷要因レベル2のフレーム参照例：ケース(B)

損傷部分は？

- 1 主桁
- 2 橋桁
- 3 線路
- 4 補脚桁
- 5 補脚材
- 6 アーチリブ
- 7 吊材
- 8 付置プレート

CHECKLIST => 4 8

*FRAME 風による振動

⑧AS-KINDS 損傷要因と作用力の推定 (1)

①損傷構造 主桁の端手

②損傷部分 主桁フランジ

③溶接種類 グループ溶接

④継手種類 実合せ継手

⑤損傷要素 グループ溶接

⑥損傷要因レベル1 溶接不良

⑦損傷要因レベル2 応力集中

⑧作用力 T継手の作用力④

図-12 損傷要因レベル1のフレーム参照例：ケース(B)

*FRAME 損傷要因と作用力の推定 (2A)

①損傷構造 主桁の端手

②損傷部分 主桁フランジ

③溶接種類 グループ溶接

④継手種類 実合せ継手

⑤損傷要素 グループ溶接

⑥損傷要因レベル1 溶接不良

⑦損傷要因レベル2 応力集中

⑧作用力 T継手の作用力④

図-16 損傷要因と作用力の推定フレーム参照例：ケース(B)

補脚桁の損傷部分は？

- 1 補脚桁取板
- 2 補脚桁上フランジ
- 3 補脚桁下フランジ

CHECKLIST => 2

*FRAME 損傷要因と作用力の推定 (2)

①損傷構造 吊材端部

②損傷部分 吊材フランジ

③溶接種類 隅肉溶接

④継手種類 T継手

⑤損傷要素 吊材端部

⑥損傷要因レベル1 風による振動

⑦損傷要因レベル2 応力集中

⑧作用力 T継手の作用力④

図-13 損傷要因と作用力の推定フレーム参照例：ケース(B)

*FRAME T継手の作用力④

⑧AS-KINDS 損傷要因と作用力の推定 (1)

①損傷構造 主桁の端手

②損傷部分 主桁フランジ

③溶接種類 グループ溶接

④継手種類 実合せ継手

⑤損傷要素 グループ溶接

⑥損傷要因レベル1 溶接不良

⑦損傷要因レベル2 応力集中

⑧作用力 T継手の作用力④

図-17 作用力のフレーム参照例：ケース(B)

溶接種類は？

- 1 隅肉溶接
- 2 グループ溶接
- 3 溶接なし

CHOOSE ONE => 1

継手種類は？

- 1 T継手
- 2 実合せ継手
- 3 片面部接継手

CHOOSE ONE => 1

損傷要素は？

- 1 主桁腹板
- 2 主桁下フランジ
- 3 橋桁腹板
- 4 橋桁下フランジ
- 5 補脚桁腹板
- 6 補脚桁上フランジ
- 7 アーチリブ
- 8 アーチリブ取板
- 9 吊材腹板
- 10 垂直補脚材
- 11 ダイアフラム腹板
- 12 ガセットプレート
- 13 隅肉溶接
- 14 グループ溶接

CHOOSE ONE => 6

図-10 損傷要因と作用力の推定システムの推論実行例：ケース(B)

*FRAME 損傷要因レベル1

⑧AS-COMPONENTS 風による振動

①損傷構造 吊材端部

②損傷部分 吊材フランジ

③溶接種類 隅肉溶接

④継手種類 T継手

⑤損傷要素 吊材端部

⑥損傷要因レベル1 風による振動

⑦損傷要因レベル2 応力集中

⑧作用力 T継手の作用力④

図-14 損傷要因レベル1のフレーム：ケース(B)

*FRAME 損傷要因と作用力の推定 (9)

①損傷構造 対横橋と主桁の連結部

②損傷部分 主桁腹板

③溶接種類 隅肉溶接

④継手種類 T継手

⑤損傷要素 主桁腹板

⑥損傷要因レベル1 横分配作用

⑦損傷要因レベル2 ディテールの不適性

⑧作用力 2次応力の応力集中

図-18 損傷要因と作用力の推定フレーム参照例：ケース(B)

成する。

ただし、損傷部分として2つ以上の要素が入力されることがあるが、文字列型事象ではこれを取り扱うことができないので、フレーム型事象を用いることにした。まず、ダミーのフレーム型仮説を用意し、そのフレームの-slot (損傷部分) の値を "DUMMY" としておく。そして、フレーム型事象より得られた-slot 値 (損傷部分の要素) を追加し、フレームを更新する。複数の場合、この作業を繰り返す。終了すると、これをフレーム型事象にセットする。さらに、slot 値の中の先頭にある "DUMMY" を削除するようにフレームを更新し、セットしなおす。なお、slot 値の追加と削除は UTI LISP 関数を用いて行った。

また、slot 値のマッチングは UTI LISP 関数では直接記述できないため、ユーザ定義の関数を UTI LISP を用いて作成した。前述の損傷部分の広い知識に対するマッチングを実現するため、表-1の事例の要素の集合が、ルールによりセットされた要素の集合に含まれる場合に成立する関数を作成した。

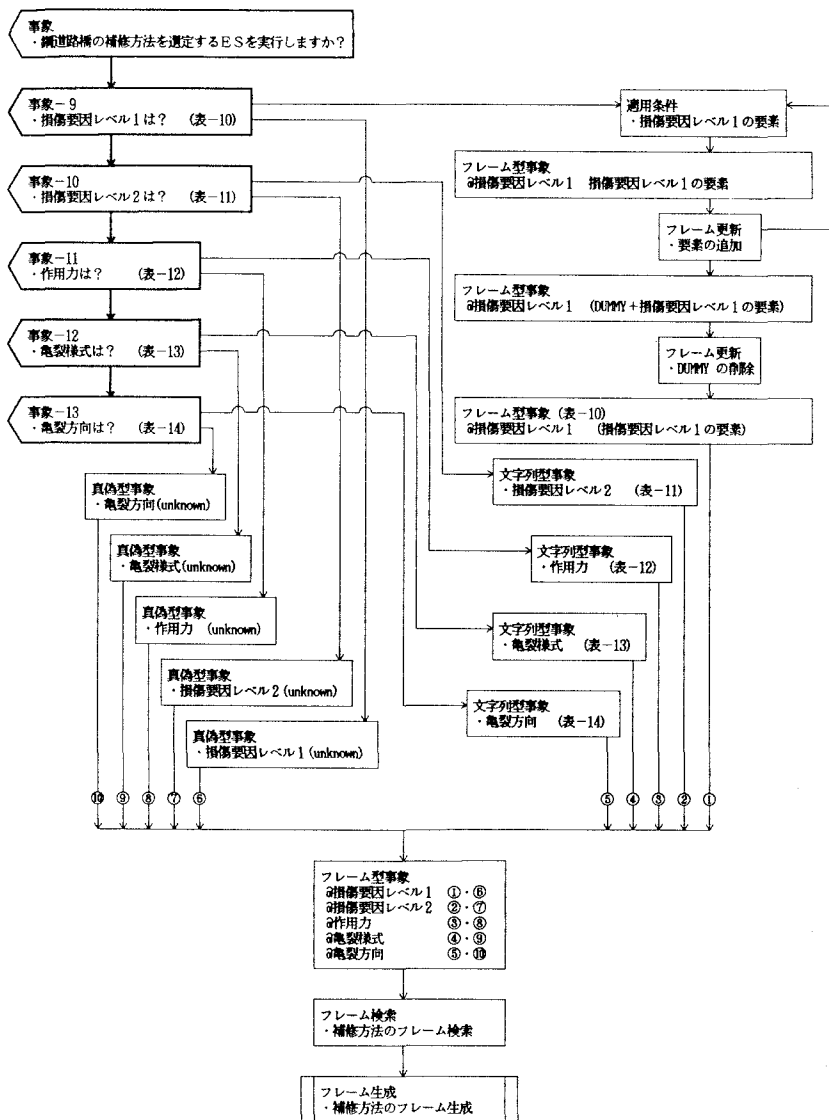


図-19 補修方法選定システムにおけるルールの流れ

(2) 推論実行例

「損傷構造は？」の問いに、「吊材と補剛桁の連結部」の"14"を選ぶ。「損傷部分は？」の問いに、「補剛桁」と「付属プレート」を考えて"4"と"8"を選ぶ。「補剛桁の損傷部分は？」に対して、「補剛桁上フランジ」の"2"を、「付属プレートの損傷部分は？」に対して、「ガセットプレート」の"1"を指定する。「溶接種類は？」の問いに「隅肉溶接」の"1"を、「継手種類は？」の問いに「T継手」の"1"を、「損傷要素は？」の問いに「補剛桁上フランジ」の"6"をそれぞれ選ぶ。

「風による振動」を損傷要因レベル1の要素として保持しているフレームがスロットHAS-KINDSで定義され、マッチングされた事例(1)、(89)の他に、事例(2)、(61)が表示されている。

図-12のスロットCOMPONENT-OFで定義されている「損傷要因レベル1」のフレームを参照すると、図-14が表示される。これは「損傷要因レベル1」の一覧である。

フレーム生成
・補修方法のフレーム生成

×?

補修方法選定のフレーム
a損傷要因レベル1 損傷要因レベル1の要素
a損傷要因レベル2 損傷要因レベル2の要素
a作用力 作用力の要素
a亀裂様式 亀裂様式の要素
a亀裂方向 亀裂方向の要素
a補修方法 補修方法の要素
a損傷状況 損傷状況の要素

×90

補修方法の要素のフレーム
aHAS-KINDS 補修方法選定
.
.
.
aCOMPONENT-OF 補修方法

×27

補修方法のフレーム
aHAS-COMPONENT ストップホール
ガウジング
.
.
.
補修方法不明

損傷要因レベル1の要素のフレーム
aCOMPONENT-OF 損傷要因レベル1

×11

損傷要因レベル2の要素のフレーム
aCOMPONENT-OF 損傷要因レベル2

×5

作用力の要素のフレーム
aCOMPONENT-OF 作用力

×13

亀裂様式の要素のフレーム
aCOMPONENT-OF 亀裂様式

×12

亀裂方向の要素のフレーム
aCOMPONENT-OF 亀裂方向

×4

— 987 —

「作用力」の「T継手の作用力②」のフレームを参照すると、図-17のように表示される。深い知識を探ると、図-18の表示が得られる。

損傷要因レベル1とレベル2および作用力の推定後、補修の必要がある場合、詳細調査を行い、5つの調査項目、すなわち、損傷要因レベル1、損傷要因レベル2、作用力、亀裂様式、亀裂方向から補修方法を推定するESを考える。

ESは図-19に示すようなルー
ルの流れとして構成した。すなわ
ち、事象-9（損傷要因レベル
1）、事象-10（損傷要因レベル
2）、事象-11（作用力）、事象
-12（亀裂様式）、事象-13（亀
裂方向）の要素に対して、事例を
マッチングして、補修方法（仮説
-5）をフレームとして生成する。
ただし、損傷要因レベル1として
2つ以上の要素が入力されること
があるので、フレーム型事象を用
い、図-8の損傷部分で用いた技
法を使用する。

なお、補修方法選定のフレーム
には、損傷状況のロットを設け、
亀裂の状況の詳細を記述してある。

鋼管路橋の補修方法を決定するEISを実行しますか？
YES-NO ==> Y

検査要因レベル1は？
1 風による振動
2 活荷重の作用
3 地震による振動
4 低溫
5 横分配作用
6 ディーテルの不適性
7 2次の変形
8 材質不良
9 溶接不良
10 腐食・剥落
11 輸送架設荷重
CHECKLIST ==> 7

検査要因レベル2は？
1 応力集中
2 2次応力の応力集中
3 2次応力
4 応力集中による層間2次応力
5 残存応力
CHOOSE ONE ==> 2

作用力は？
1 T継手の作用力②
2 T継手の作用力③
3 T継手の作用力④
4 T継手の作用力⑤
5 突合せ継手の作用力②
6 突合せ継手の作用力③
7 片面添接継手の作用力④
CHOOSE ONE ==> 1

亀裂形状は？
1 T継手の亀裂形状 (a)
2 T継手の亀裂形状 (b)
3 T継手の亀裂形状 (c)
4 T継手の亀裂形状 (d)
5 T継手の亀裂形状 (e)
6 T継手の亀裂形状 (f)
7 突合せ継手の亀裂形状 (g)
8 突合せ継手の亀裂形状 (h)
9 片面添接継手の亀裂形状 (i)
10 片面添接継手の亀裂形状 (j)
11 片面添接継手の亀裂形状 (k)
12 片面添接継手の亀裂形状 (l)
CHOOSE ONE ==> 6

亀裂方向は？
1 溶接に垂直な亀裂
2 溶接に平行な亀裂
3 垂直な亀裂
4 斜め下方に亀裂
CHOOSE ONE ==> 4

図-23 補修方法のフレーム参照例：ケース(C)

ケース(C)として、損傷要因レベル1が「2次的変形」、損傷要因レベル2が「2次応力の応力集中」、作用力が「T継手の作用力②」の場合の補修方法を選定する画面を図-21に示す。初めに、「鋼道路橋の補修方法を選定するESを実行しますか?」の問いに対して「Y」を入力する。

「損傷要因レベル1は?」の問いに「2次的変形」の「7」、「損傷要因レベル2は?」の問いに「2次応力の応力集中」の「2」、「作用力は?」の問いに「T継手の作用力②」の「1」をそれぞれ選ぶ。「亀裂様式は?」の問いに「T継手の亀裂様式(f)」の「6」を、「亀裂方向は?」の問いに「斜め下方に亀裂」の「4」を選ぶ。

推論実行結果を図-22に示す。損傷要因レベル1、損傷要因レベル2、作用力、亀裂様式、亀裂方向のそれぞれの要素に対して、ルールからマッチングされたフレームは「補修方法選定(90)」、すなわち事例(90)の1つだけである。

ここで、スロット補修方法で定義されている「ストップホール」のフレームを参照すると、図-23に示すように、「ストップホール」を補修方法の要素として保持しているフレームがスロットHAS-KINDSで定義され、合計44事例がストップホールによる補修を行っていることがわかる。

7. あとがき

鋼道路橋の維持管理に役立てるため、疲労亀裂に関するESを構築した。²⁸⁾ このESは、過去の90の損傷事例に基づいて、損傷点検すべき箇所のリストを提示し、損傷が見つかった場合には、損傷要因と作用力を推定し、さらに補修方法を選定する。

知識表現としては、これまで開発されたESがほとんどプロダクション・ルールを用いているのに対して、本ESではプロダクション・ルールとフレームを併用した。また、ルールに曖昧さを持たすために確信度が用いられることが多いが、確信度を決定できるほどには知識が体系化されているとはいえない。そこで、今までESを構築^{29)~33)}してきた経験を用い、確信度を使用せず、マッチングによる推論を採用した。

この結果、ルールを用いた推論に関しては曖昧さは含んでいないが、推論結果を用い、フレームで深い知識の参照を行い、参考になる情報を得ることができるので、推論結果に幅がでる。すなわち、損傷事例に一致している場合のみならず、似通っている場合も参考にできる利点を持っている。

このシステムは90に及ぶ事例を知識ベースとしているが、詳細に検討すれば、必ずしも参考にすべきでない事例が見つかるかもしれない。これらは除かれるべきである。マッチングの結果、損傷事例が見つからなかった場合は、それが知識であるが、知識の不足が生み出した結果であることもある。しかだて、文献34)35)に見られる最近の疲労損傷と補修の事例を追加する必要がある。表-2~表-15には各要素の事例数を()内に表記してあるが、これらは事例に基づいたもので、例えば、表-5において斜橋の支点、その近傍、またはスパン中央は取り上げられるべきものである。すなわち、事例にみられないが知識としてもつべきケースを仮想の事例として知識ベースに記述することも必要であろう。

なお、専門家の知識を獲得・整理し、コンピュータ上で実行可能にすることは困難な仕事であり、この役目はKE(Knowledge Engineer)が果たすといわれるが、専門家が自ら知識ベースを構築することが最も望ましい。そのためにも、知識獲得システム(Knowledge Acquisition System)がエキスパート・シェルのサブシステムとして早期に提供されることが望まれる。

本研究には関西大学情報処理センターの汎用コンピュータ FACOM M-380およびソフトウェアSuper-BRAINSとUTI LISPを使用した。本研究は昭和62年度文部省科学研究費(課題番号62850083, 研究代表者 三木千壽)の補助を受けた。

参考文献

- 1) 国広哲男・太田実: 橋の耐荷力と寿命, 土木学会誌, Vol.55, No.11, pp.45-50, 1970.11.
- 2) 早坂博文: 高力ボルトの取換え補修 — 超音波探査法による損傷ボルトの調査方法の開発および取換え

- 補修 一, 橋梁と基礎, Vol.17, No.8, pp.60-63, 1983.8.
- 3) 石沢正俊: 維持・補修, 橋梁と基礎, Vol.21, No.1, pp.53-56, 1987.1.
 - 4) 田中雅人・鈴木博之・堀川浩甫・本村春一: 供用中の橋梁への補修・補強溶接, 橋梁と基礎, Vol.19, No.3, pp.14-19, 1985.3.
 - 5) 西川和宏: 道路橋における疲労問題と補修・補強, 橋梁と基礎, Vol.17, No.8, pp.19-23, 1983.8.
 - 6) 日本技術検査協会: 鋼道路橋の点検マニュアル, 橋梁, Vol.23, No.9, pp.38-49, No.10, pp.50-60, No.11, pp.45-53, No.12, pp.33-39, 1987.9-12.
 - 7) 鋼構造委員会疲労変状調査小委員会: 鋼橋の疲労変状調査, 土木学会論文集, No.368/I-5, pp.1-12, 1986.4.
 - 8) 西川和宏: プレートガーダー橋の疲労損傷例, 道路, pp.58-63, 1985.7.
 - 9) Fisher, J.W., 三木千寿: 米国の溶接橋梁に生じた疲労被害例, 橋梁と基礎, Vol.16, No.10, pp.18-24, 1982.10.
 - 10) 三木千寿, Fisher, J.W.: 海外の橋梁における疲労問題と補修・補強, 橋梁と基礎, Vol.17, No.8, pp.30-34, 1983.8.
 - 11) 三木千寿・西川和宏・Fisher, J.W.: 鋼橋の疲労損傷とその検査, 橋梁と基礎, Vol.20, No.5, pp.17-21, 1986.5.
 - 12) Fisher, J.W., 阿部英彦, 三木千寿: 鋼橋の疲労と破壊 — ケーススタディー —, 建設図書, 1987.
 - 13) 三木千寿: 米国における道路橋の破損と保守, 道路, pp.26-30, 1982.11.
 - 14) 酒井吉永・松井鋭一・山田健太郎・近藤明雅: 亀裂の突合せ溶接補修とその疲れ挙動, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.33A, pp.411-420, 1987.3.
 - 15) 峰久節治: 溶接構造の損傷とその防止, 溶接学会誌, Vol.52, No.5, pp.32-43, 1983.5.
 - 16) 堀川浩甫: 溶接構造の損傷とその防止, 溶接学会誌, Vol.52, No.7, pp.13-22, 1983.7.
 - 17) Kostem, C.N. and Maher, M.L. (ed.): Expert Systems in Civil Engineering, ASCE, 1986.
 - 18) 古田均, Fu, K.S., 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, pp.28-33, 1985.9.
 - 19) Godfrey, K.A., Jr.: Expert systems enter the marketplace, Civil Engineering-ASCE, pp.70-73, May, 1986.
 - 20) 阪神高速道路における土木構造物補修事例集, 阪神高速道路公団保全施設部, (財)阪神高速道路管理技術センター, 1982.7.
 - 21) 福岡良典: 鋼橋の疲労損傷診断に関するエキスパート・システム, 東京工業大学卒業論文, 1987.3.
 - 22) 三木千寿・坂野昌弘・館石和雄・福岡良典: 鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析, 土木学会論文集, No.392/I-9, pp.403-410, 1988.4.
 - 23) 朝東洋情報システム: 推論システム Super-BRAINS 利用者マニュアル, 1986.3.
 - 24) 安西祐一郎・佐伯胖・無藤隆: LISPで学ぶ認知心理学 I 学習, 東京大学出版会, 1981.
 - 25) 小川均: フレーム理論に基づく知識表現言語, 情報処理, Vol.26, No.12, pp.1497-1503, 1985.12.
 - 26) 松原仁: 独創的ミンスキー論, フレーム理論が遺したもの, AIジャーナル, No.5, pp.34-39, 1986.8.
 - 27) 小山照夫: 知識表現言語, 情報処理, Vol.26, No.12, pp.1529-1535, 1985.12.
 - 28) 三上市蔵・三木千寿・田中成典: 研究報告=鋼道路橋の疲労亀裂に関するルールとフレームによる知識ベース・エキスパートシステム, 関西大学工学部土木工学科, 1988.3.
 - 29) 三上市蔵・江澤義典・森澤敬文・田中成典・朝倉隆文: RC床版の点検・補修に関するエキスパート・システム, 第11回電算機利用に関するシンポジウム講演集, 土木学会, pp.159-166, 1986.10.
 - 30) 三上市蔵・江澤義典・田中成典・朝倉隆文: 道路橋鉄筋コンクリート床版の損傷度判定と補修工法選定のための知識ベースエキスパート・システム, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.33A, pp.317-325, 1987.4.
 - 31) 三上市蔵・田中成典・安藤黄太・小森宏昭: 道路橋RC床版の経年を考慮した補修工法選定のためのエキスパート・システム, 第12回電算機利用に関するシンポジウム講演集, 土木学会, pp.185-192, 1987.10.
 - 32) 三上市蔵・田中成典・小森宏昭・安藤黄太: 日本道路公団の損傷度判定法に基づく道路橋RC床版の補修工法選定のためのエキスパート・システム, 第12回電算機利用に関するシンポジウム講演集, 土木学会, pp.73-76, 1987.10.
 - 33) 三上市蔵・松井繁之・田中成典・新内康芳: 道路橋鉄筋コンクリート床版の損傷要因推定のためのルールとフレームによる知識ベースエキスパート・システム, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.34A, 1988.3.
 - 34) 阪神高速道路における土木構造物補修事例集Ⅱ, 阪神高速道路公団保全施設部, (財)阪神高速道路管理技術センター, 1987.3.
 - 35) 阪神高速道路公団, (財)阪神高速道路管理技術センター: 技報, No.6, 1986.

(1988年10月12日受付)