

事例ベース推論とルールベース推論を併用した鋼橋疲労損傷の補修方法選定システムの開発

Combined Knowledge-Based Expert System of Case-Based Reasoning and Rule-Based Reasoning to Select Retrofitting Method for Steel Bridge Fatigue Damage

田中成典* 三上市蔵** 前田秀典*** 小林篤司****

By Shigenori TANAKA, Ichizou MIKAMI, Hidenori MAEDA, and Atsushi KOBAYASHI

* 工修 関西大学専任講師 総合情報学部 (〒569 高槻市霊仙寺町2丁目1番1号)

** 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)

*** 工修 (株) 東洋情報システム (〒564 吹田市江坂町1丁目13番33号); 元 関西大学大学院

**** 関西大学大学院博士課程前期課程 (〒564 吹田市山手町3丁目3番35号)

We have studied knowledge-based expert systems (KBES) to select the retrofitting method for the steel bridge fatigue damage. The systems based on rule-based reasoning (RBR) have the difficulty of acquiring the knowledge-base. The case-based reasoning (CBR) system is able to solve the problem of knowledge acquisition and make an efficient inference based on similar cases.

In the present paper, we discuss merits and demerits of CBR compared with RBR and database (DB). To remove the CBR's demerits, we propose a combined KBES of CBR and RBR to select the retrofitting method for the steel bridge fatigue damage. We discuss the processes of this system divided into three modes; i.e. beginner, senior, and professional mode. We construct the KBES in professional mode. Discussing the inference results obtained from this system, we can find that this system is very useful. In addition, we make the future problem clear at issue.

Keywords : *Knowledge-Based Expert System, Case-Based Reasoning, Rule-Based Reasoning, Steel Bridge, Fatigue Damage, Retrofitting Method*

1. まえがき

知識情報処理の応用技術として知識ベースエキスパートシステム (Knowledge-Based Expert System: KBES) の研究が盛んに行われてきた。KBES は、ある特定の分野において専門技術者の経験知識をコンピュータに蓄積して、誰もがその知識を共有できる仕組みを提供することに主眼を置いている。

著者らは、維持管理分野の鋼道路橋の疲労亀裂に対する補修方法を選定するための KBES^{1)~4)} を開発してきた。文献 1) から 3) は、ルールベース推論 (Rule-Based Reasoning: RBR) 手法の一種である因果関係知識と様相論理による推論手法を用いた。文献 4) では、事例ベース推論 (Case-Based Reasoning: CBR) を用いて抽象化照合と部分照合などの検索機能に重点を置いた。前者の研究^{1)~3)} において、RBR は、専門家の経験的知識から汎化なルールを獲得し、そのルールを基に効率的な推論が行えることが分かった。また、後者の研究⁴⁾ において、CBR は、専門家の知識のみならず事例として獲得された知識を用いることにより、例化な推論結果が得られることが分かった。

他の分野における知識情報処理の要素技術の動向としては、CBR に関する研究^{5)~24)} が精力的に行われている。そこでは、CBR の概要とそれに付随した関連技術について紹介した研究^{5)~9)}、CBR を適用して実用システムを目指した応用例^{10)~16)} や、CBR と RBR を併用したシステムの応用例^{17)~24)} がある。

まず、文献 5) では、CBR が期待されている理由や、

その特徴について詳細にまとめられている。また、解の正当化問題や、領域知識とユーザとの協調問題について触れている。文献 6) では、CBR の特徴と要素技術の係わりについて説明されている。文献 7) では、人間の問題解決の方法を分析することから始まり、CBR の推論手法を分類すると共に構築環境と構築手順、備えておくべき要件について説明されている。文献 8) は、CBR が適用できる問題領域を分類している。ここでは、発見的探索問題、同定問題、計画問題、学習問題、制御問題、設計問題、診断問題が紹介されている。文献 9) では、CBR の効率化を実現するための要素技術が説明されている。

次に、CBR の適用例として、診断型¹⁰⁾ 制御型¹¹⁾ 設計型^{12)~15)} 計画型¹⁶⁾ システムが報告されている。

しかし、CBR では、過去の事例が体系的な汎化知識を網羅していないため、解空間の信頼性や類似解の正当性についての問題点が指摘⁵⁾ されている。そこで、最近の研究^{17)~24)} においては、CBR と RBR を併用する方法が提案されている。その中でも、RBR に重きを置き CBR を補助的に使用している研究^{17)~20)} や、逆に、CBR に重きを置き RBR を補助的に使用している研究^{21)~22)}、CBR と RBR とが相補的な関係にあるとして両者を対等に考えて併用している研究^{23)~24)} がある。

そこで、本研究では、CBR と RBR とを併用した KBES を開発することを目的とする。まず、2 章では、CBR の長所を RBR とデータベース (DataBase: DB) とから比較する。また、CBR 特有の長所についても触

れる。逆に、CBRの短所についても明らかにする。そして、CBRとRBRとの併用について有効性を議論する。3章では、システム化の構想について考え、鋼道路橋の上部構造に発生する疲労亀裂を対象とした補修方法の選定に関する問題をドメインとして設定する。ここでは、ドメイン特有の問題解決の方法と知識の定義、システムの役割とシステムの概要仕様を述べる。4章では、CBRとRBRを併用したシステムの詳細仕様を考案し、CBRとRBRの役割分担を明確に規定する。そして、ドメイン知識をシステムの枠組みにあてはめてCBRとRBRを併用した知識情報処理技術の検証を行う。

2. CBRとRBR

事例ベース推論 (Case-Based Reasoning : CBR) を用いた知識ベースエキスパートシステム (Knowledge-Based Expert System : KBES) を開発する上で、CBRの長所と短所をまとめる。特に長所は、ルールベース推論 (Rule-Based Reasoning : RBR) とデータベース (DataBase : DB) との比較の観点からまとめた。そこで、システム作りの方針を明らかにする。

2.1 CBRの長所

2.1.1 RBRより優れている点

RBRは、知識工学の学問から生み出された知識情報処理技術である。ただし、知識獲得、推論形態、学習方法、矛盾知識の取り扱いなどの未だ確立されていない技術も多く、研究段階の域を脱していない。そこで、RBRの問題を少しでも低減するために最近ではCBRが注目されてきた。本研究では、CBRがRBRに勝っている点を以下に列記する。

- ①知識の獲得⁵⁾
- ②知識の信頼性
- ③事例が優先する問題領域⁵⁾
- ④イレギュラーな推論⁵⁾⁶⁾
- ⑤知識の自己組織化⁵⁾
- ⑥大規模なシステム構築

①の知識獲得の点では、CBRの事例データを獲得する方がRBRの知識ベースを獲得するよりも容易である。なぜなら、CBRは過去の事例データをそのまま知識として利用できるためである。次に、②に関しては、RBRの知識ベースは、矛盾知識などから知識の信頼性について厳密な検証を行わなければならないが、CBRの事例データは、過去の実績である事例データをそのまま知識として利用するため知識の信頼性が高い。③では、ある業種によれば、RBRの知識ベースを基にした汎化知識から導き出された結果 (一般解) よりも、CBRの過去の事例データを基にした例化知識から導き出された結果 (局所解) から問題解決を行うことがある。また、④においては、RBRでは、知識ベースに存在しない知識は扱えず知識ベースを逸脱した推論結果

を導き出すことは不可能であるが、CBRでは、イレギュラーな問題に対しても処理することが可能である。⑤では、RBRの知識ベースよりも知識の追加 (新たな事例の追加)、修正 (誤って入力された事例の修正)、削除 (陳腐化した事例の削除) の方法が容易である。最後に⑥に関しては、RBRだけで大規模な知識ベースを作成することはほとんど不可能であるが、CBRでは、事例データを追加拡張するだけで大規模事例知識データベースが構築できる。

2.1.2 DBより優れている点

DBは、データ工学の学問から生み出された情報処理技術である。これは、情報処理分野で最も研究が進み実用レベルまで達しているが、知識工学の要素は少なく、知識情報処理とは区別されている。ただし、CBRは、DBと似かよっている箇所があるため、明確な区別が必要である。そこで、CBRがDBに勝っている点を以下に記述する。

- ⑦情報検索⁵⁾
- ⑧問題解決機構⁵⁾

まず、⑦に関しては、DBにおける正確な検索条件を必要とするキーワード検索に比べて、知的な情報検索、いわゆる曖昧な検索が可能である。そのため、類推推論から類似事例を検索したり、誘導類推からデータとして存在しない事例を生成しながら情報検索することが可能である。また、探索空間の調整を自由に行うことが可能であるため探索時間を減少できる。⑧では、DBは、問題を解決する仕組みがないため、得られた結果の意味解釈は人間が行わなければならないが、CBRでは、問題解決機構が備わっているため、検索、修正、修復、格納などの処理が半自動的に行われる。

2.1.3 特有の長所

CBR特有の長所として、次に示す失敗事例の取り扱いがある。

- ⑨失敗事例の取扱い⁵⁾

CBRでは、失敗事例の知識を取り扱うことができるため、同じような失敗を二度と繰り返さない。また、その失敗原因を一般化することで失敗の予測を行うことが可能である。

2.2 CBRの短所

CBRでは、以下に示す短所がある。これらの短所は、CBRだけでは克服できない課題である。

- ①解空間の信頼性⁵⁾
- ②類似解の正当性⁵⁾
- ③領域知識の必要性

まず、①では、獲得された事例が、全ての解空間を網羅しているのかという点に信頼性が欠ける。ゆえに、課題に対する解が最適であるか保証されない。また、

②では、類推推論から得られた類似解の正当性を裏付ける手段が確立されていない。最後に、③では、システムの完全な自動化を目指す場合、検索プロセスにおいて得られた複数の類似事例からどの事例を採用するか、また、事例の修正や修復プロセスにおいてどのような処理を施すか、などの領域知識が必要不可欠である。

2.3 システムの方針

CBR は、長所を 2.1 節でまとめたように、RBR や DB より優れた点が多々ある。裏返せば、RBR の短所や DB の短所を克服している。RBR や DB の技術だけで KBES を構築する場合、克服しなければならない問題が多い。また、2.2 節でも明らかにしたように、CBR は、解空間の信頼性や類似解の正当性に問題がある。そして、様々なプロセスでは、領域知識が必要とされる。

したがって、CBR と RBR を併用することによって KBES を構築すれば、CBR の長所が RBR の短所を補い、CBR の短所を RBR の長所が補える。CBR と RBR は相補的な関係にあり、併用することによって双方の能力を引き出すことができる。たとえば、RBR の結果を CBR によって裏付けたり、逆に、CBR の結果を RBR によって補完することが考えられる。

3. システム化への構想

3.1 ドメインの問題解決

本研究で対象とするドメインは、鋼道路橋の上部構造に発生する疲労亀裂に対する補修方法を選定するための維持管理分野である。疲労亀裂の損傷に関しては、図 1 に示す原因から現象への因果関係と、現象から対策への因果関係が存在する。通常の維持管理業務においては、現場の専門技術者は次の三通りのケースで問題解決を行っている。まずケース①では、疲労亀裂の損傷が発生している箇所と損傷の現象から過去に経験した事例を思い出しながら対策の処置を施す。ただし、この場合、当該現象も過去の事例と同じ損傷原因であろうという推測から行なわれるものである。また時には、ケース②の損傷の現象から損傷状況とその状態を把握しながらその損傷原因を専門的な領域知識を用いて追求した後、その原因を直接取り除くような対策の処置を施す。また、ケース③では、損傷の現象とその原因の両方を考慮して補修・補強の対策を施す方法で、これは①と②を統合したケースである。ここで、それぞれのケースから想定される KBES のシステム化の方法は、次の通りである。

まずケース①では、現象から対策への事例は過去の実績から容易に獲得できるため CBR の手法を用いることが望ましい。またケース②の現象から原因を追求して対策に至る過程においては、前半部に RBR を後半部に CBR を用いることが望ましい、なぜなら前半部の原因から現象への事例は過去の実績として獲得することができず、たとえ実績として事例が獲得されたとしてもそれは推測された事例であるため CBR の手法

を用いることは望ましくない。よって、原因から現象への因果関係知識を用いて、現象から逆に原因を推測する RBR の手法を用いる方が望ましい。また後半部の原因に対する対策の事例は、前半部に比べて実績としての事例は獲得し易い。よって、RBR 手法より CBR 手法の方が有効である。ただし、原因から対策に対しても因果関係が成立するため、RBR 手法を併用することも考えられる。最後に、ケース③では、ケース①と②を統合した場合であるため、CBR と RBR を併用した方法が最も効果的である。

本研究では、図 1 の時系列の維持管理業務の問題解決において、ケース③の方法を採用するため、CBR と RBR を併用したシステム開発を行う。そこで、既存システム^{1)~4)} のドメイン知識を図 2 に示す現象、原因と対策の各項目に沿ってそれぞれの属性を拡張する。

3.2 ドメイン知識の拡張

まず、現象の属性としては、橋梁概要と損傷箇所および損傷状態に関する属性を考慮する。橋梁概要に関する属性は、現象とは直接関係しないが原因や対策などの補足情報として活用する。たとえば、国名や架設年などからは設計時の道路橋示方書の違いによる原因や対策方法の違いを、また、損傷発生までの経年数から対策方法を、地域特性や構造形式から原因や対策方法を読み取る。次に損傷箇所に関する属性は、現象の箇所を説明する損傷位置 (属性値としては、橋中央部、中間支点上など)、ブロック (損傷が発生した場所を示し、属性値としては、主桁、横桁など)、サブブロック (損傷が発生した位置の一般的な名称およびその特徴を示し、属性値としては、アーチリブ取付部、吊材取付部など)、損傷部位 (損傷が発生した部位を示し、属性値として、溶接部、一般部、添接部)、損傷構造 (損傷部位を構成する構造を示し、属性値としては、主桁、横桁など)、部材 (損傷構造を構成する部材)、損傷部材 (損傷が発生している部材を示し、属性値としては、主桁上フランジなど)、溶接種類 (損傷部位が溶接である場合、その溶接の種類を示し、属性値としては、隅肉溶接、グループ溶接など) を考慮する。最後に、損傷状態に関する属性としては、損傷方向、亀裂様式、損傷規模、補修歴を考慮する。

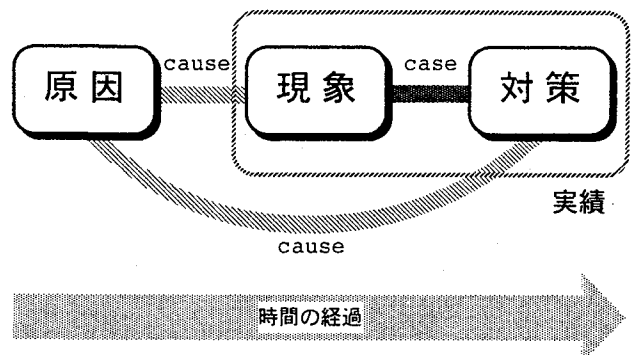


図 1 問題解決における時系列の関係

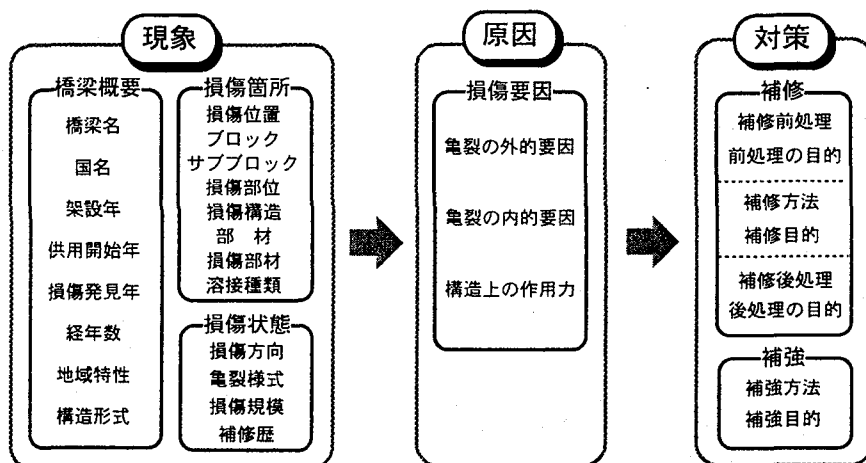


図2 事例で考慮する属性

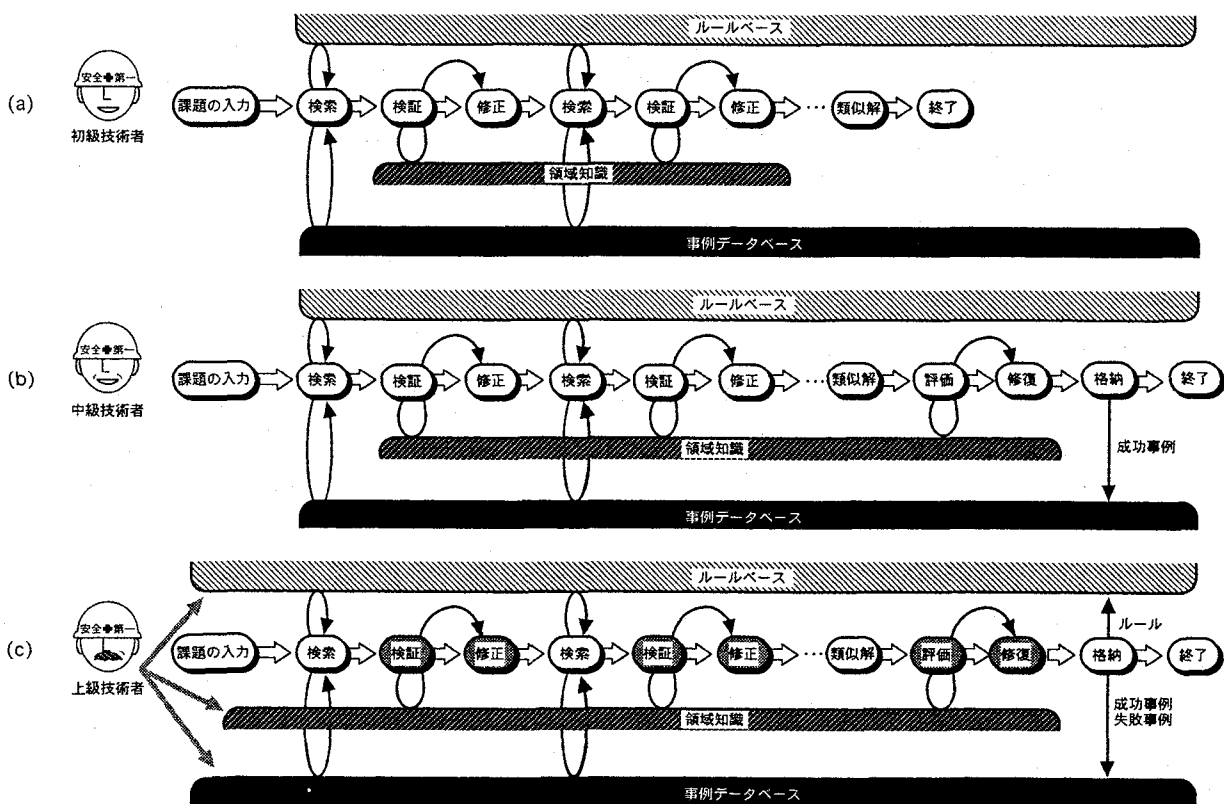


図3 システムの構想

次に、原因の属性としては、亀裂の外的要因（風による振動、活荷重の作用、面外方向の変形、支承の損傷など）、亀裂の内的要因、その要因から生じる作用力を考慮する。

最後に、対策の属性としては、補修と補強に関する属性を考慮する。前者は、補修の前処理、補修方法、補修の後処理などの属性に加えて、それぞれの目的に関する属性を考慮する。後者では、補強方法とその補強目的に関する属性を考慮する。

これらの属性の定義に従い、文献より 205 件の事例

データを獲得した。また、各属性ごとに重みを考慮した。

3.3 KBES の役割

KBES は、ある専門に特化した熟練技術者の代替を担うものであるが、一部の学術研究者によれば、それは不可能であると考えられている。しかし、実際の実務レベルにおいては、コストの高い上級技術者が直接現場で作業することは少なく、むしろ初級・中級技術者で補っているのが現状である。たとえ上級技術者が直接作業するとしても、多種多様な多くの問題を少数

の上級技術者で対処することは困難であるため、初級、中級技術者の補助を必要とする。

そこで、最近の傾向として、KBESの定義が曖昧になりつつあり、しかもその役割が時代と共に変化していることを加味して、本システムでは、その役割を以下のように整理した。

- ①初級技術者への教育
- ②中級技術者への助言
- ③上級技術者の再教育
- ④技術者の作業緩和
- ⑤知的財産の蓄積と次世代への伝達

まず、①では、中級、上級技術者不足による初級技術者の代替や、初級技術者の養成時に領域知識の概念を教育するなどが考えられる。②では、中級技術者の作業効率を高めるための付加価値のある情報を提示したり、中級技術者の決断を支援するなどが考えられる。③では、上級技術者の偏った知識を修正するための再教育が考えられる。④では、危険な環境下での技術者の作業緩和や、ヒューマンエラーに対する見落としの防止などが考えられる。⑤では、知的情報の整理と体系化による社会の共有財産の蓄積と社会への還元および、次世代への技術継承が大きな役割である。

3.4 システムの概要仕様

CBRとRBRの両手法を併用したシステムの構想を図3に示す。ここでは、3.3節の役割を基に、ユーザのレベルに応じて処理手順を三種類のモードで区別する。なぜなら、上級技術者がシステムを利用することで効率の良い問題解決がなされる環境を提供すると共に、初級、中級技術者でさえも、システムからの支援を受け最適ではないかもしれないが間違いではないような問題解決を行える環境を提供するためである。

図3(a)の初級技術者モードでは、検索、検証、修正プロセスのみ利用でき、検索プロセスでは全自動の、検証と修正プロセスでは、領域知識を用いた半自動の処理を実行する。図3(b)の中級技術者モードでは、初級技術者モードに加えて評価プロセス、修復プロセス、成功事例に限定した格納プロセスが利用でき、評価プロセスと修復プロセスは領域知識を用いた半自動の、格納プロセスは全自動の処理を実行する。

また、図3(c)の上級技術者モードでは、中級技術者モードに加えて失敗事例を考慮した格納プロセスが利用できる。また、初級、中級技術者モードで採用した半自動の処理は、手動でも行えるようにする。なぜなら、上級技術者では、検証や評価を含む種々の判断においてシステムが保持している領域知識を利用しなくても良いためである。また、上級技術者モードでは、事例データベース、ルールベース、領域知識の保安全管理も手動で行える。いわゆるスーパーユーザモードである。

まず、初級技術者モードでは、鋼道路橋に発生している疲労亀裂の損傷から、目視できる現象を課題とし

て入力する。この入力された課題に対して、検索プロセスでは二通りの処理が適用される。一方は、課題として入力された現象からCBRの処理過程を用いて実績のある類似事例を照合しながら例化な対策(補修・補強)を類推する。他方は、課題として入力された現象からRBRの処理過程を用いて汎化な損傷原因を推測し、さらに、その原因に対する汎化な対策(補修・補強)を推定する。次の検証プロセスでは、検索プロセスから得られた結果を半自動的に評価する。ここでは、検索プロセスで得られた例化な検索結果に重きを置き、汎化な推論結果を例化な検索結果に対する評価の手段として用いる。また、システムからの領域知識を用いた裏付けの質問に答えることによって、半自動的に推論結果の妥当性を検証しながら課題を同定させる。その結果、推論結果に妥当性がない場合や、領域知識を用いた同定に失敗したならば、入力された課題に多少の問題があると想定されるため、次の修正プロセスで課題の微小な修正を自動的に施し、候補となる課題を提示する。この候補となる課題の自動生成は、検証プロセスから得られた情報を基に作成される。そして、その候補となる課題を用いて、検索プロセスから検証プロセスを経由して修正プロセスの処理過程を繰り返す。その場合、検証プロセスにおいて、課題に対する推論結果の妥当性が検証できれば初級技術者モードを終了する。

次に、中級技術者モードでは、初級技術者モードの各プロセスに加えて、評価プロセスと修復プロセスが作動し、得られた推論結果に妥当性があれば成功事例として認定し、格納プロセスで成功事例を事例データベースに格納する。評価プロセスでは、推論結果のさらなる妥当性の検証を行い、修復プロセスで推論結果に対して微小な修正処理を施す。ここでは、初級技術者モードの検証プロセスと同様に、システムからの領域知識を用いた裏付けの質問に答えることによって、推論結果の各項目を同定させる。同定させることに成功したならば、格納プロセスに、失敗したならば、修復プロセスにおいて推論結果に微小な修正を自動的に施し、候補となる推論結果を提示する。この候補となる推論結果の自動生成は、評価プロセスから得られた情報を基に作成される。そして、次の格納プロセスにおいてその結果を成功事例として格納し、中級技術者モードを終了する。

最後に、上級技術者モードでは、中級技術者モードの各プロセスに加えて、失敗事例を考慮した格納プロセスが追加される。よって、検索プロセスから格納プロセスまでの全プロセスにおいて、失敗事例を考慮しながら処理が行われる。

4. システムの詳細仕様

本システムは、図3の三種類のモード別に構成されているが、ここでは、図3(c)の上級技術者モードを例に採ってシステムの詳細仕様を述べる。詳細仕様は、図4(a)の検索、検証、修正プロセスまでと図4(b)の評価、

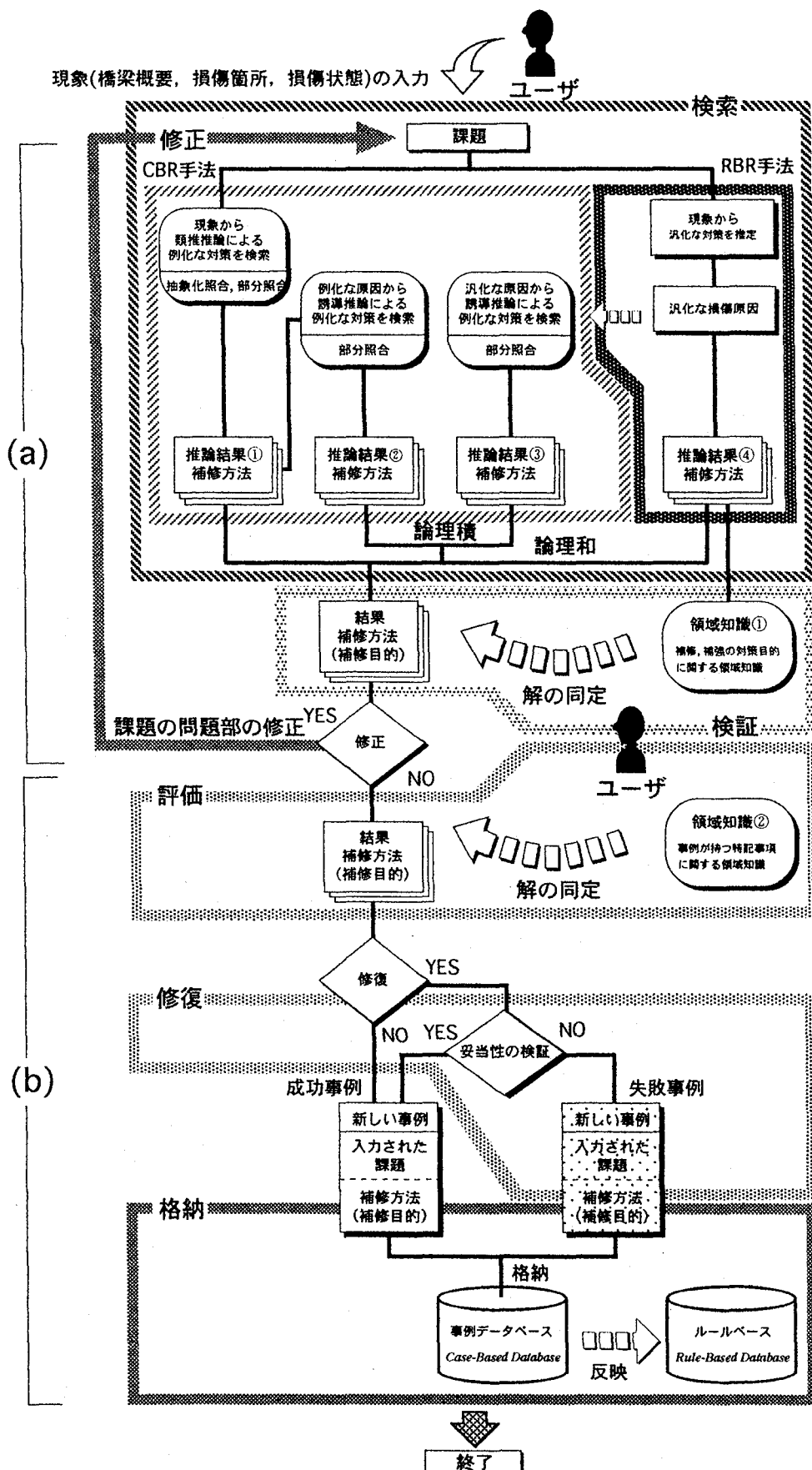


図4 検索・検証・修正プロセスと評価・修復・格納プロセス

修復，格納プロセスまでとに分けて説明する。ただし，初級，中級技術者モードで採用している半自動処理の手順は織り交ぜて説明する。

4.1 検索・検証・修正プロセス

本システムでは，入力項目（課題）として図2の現象を用いる。課題が入力されると検索プロセスにおいて図4(a)に示す四種類のカテゴリーに分けられた推論結果①から④が導き出される。ここで，①と②は，CBRのみ用いたカテゴリー，③は，RBRとCBRを用いたカテゴリー，そして④は，RBRのみ用いたカテゴリーの推論結果である。CBRの検索手法には，文献4）で考案した抽象化照合と部分照合の二種類を採用する。しかし，類似度の計算方法は，次のように拡張した。

たとえば，図5に示すように課題の属性A（属性値a），属性B（属性値b，c），属性C（属性値unknown），事例データの属性A（属性値a，d），属性B（属性値b），属性C（属性値e）の場合を考える。まず，課題と事例データの属性ごとの一致度（0～1）を計算する。課題の属性値と事例データの属性値との双方が一致している属性値の数から，式（1）を適用して属性ごとの一致度を計算する。ただし，Cは任意の値（0～1）を採り，一致していない属性値の影響度を考慮するものである。

$$\text{一致度}_i = \frac{\text{一致している属性値の数}}{\text{課題の属性値の数}}$$

$$-C \times \frac{(\text{事例データの属性値の数}) - (\text{一致している属性値の数})}{\text{課題の属性値の数}} \quad (1)$$

式（1）により属性ごとの一致度が計算されると，次に，全ての属性を考慮して事例データの課題に対する類似度を式（2）を用いて計算する。ただし，Wは各属性の重み（0～1の任意の値）である。

$$\text{類似度} = \frac{\text{属性値が既知の属性の数}}{(\text{課題の属性の数})^2} \sum W_i \times \text{一致度}_i \quad (2)$$

図5の場合，C = 0.5 とすると，属性Aの一致度は，一致度_A = 1/1 - 0.5 × (2 - 1)/1 = 0.5 である。同様

に，属性Bでは，一致度_B = 1/2 - 0.5 × (1 - 1)/2 = 0.5 となる。属性Cは属性値が不明（unknown）であるため，一致度の計算は行われない。また，属性Aの重み（W_A）が1.0，属性Bの重み（W_B）が0.75の場合，課題の属性の数は3，属性値が既知である属性（ここでは，属性A，B）の数が2であるから，課題に対する事例データの類似度は，類似度 = 2/3² × (W_A × 一致度_A + W_B × 一致度_B) = 0.19 と計算される。以上の計算方法により類似度が算出される。

推論結果①では，損傷の現象（課題）に対して事例データベースを類推検索し，例化な対策（推論結果①）を得る。ただし，この解は，補修や補強の対策を決定する上で，重要視しなければならない損傷原因を考慮していないため解の信頼性に欠ける。そこで，推論結果①で得られた事例データから原因となる例化な損傷要因を自動的に抽出し，その損傷要因を誘導類推しながら例化な対策（推論結果②）を得る。しかし，この結果を持っても全ての解空間を満たしているとは限らないため，RBRとCBRを併用したさらなる例化な対策（推論結果③）を得る。

これは，損傷現象（課題）からRBRの推論過程に従って損傷要因を推定し，その結果を用いてCBRを適用し例化な対策を推論したものである。これら三種類の例化な類似解を導き出すことによって，ほとんど全ての解空間を満たしていると考えられる。そして，推論結果④は，RBRを適用して推論された損傷要因を経由して，それから汎化な対策を推定したものである。こ

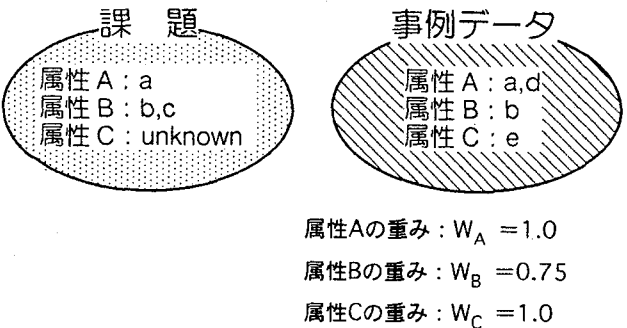


図5 類似度の計算例

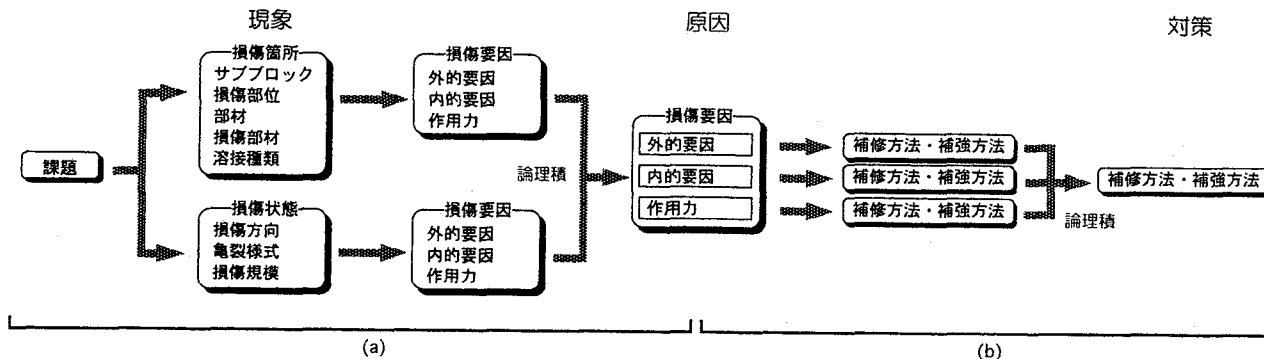


図6 RBR部の推論過程

れは、画一化された推論結果であるため、例化な類似解(①から③)と違って特殊な結果が導き出されない。

ここで、RBR部の推論手順を図6に示す。まず、入力された課題を損傷箇所と損傷状態に関する属性に分類する。次に、損傷箇所→損傷要因、損傷状態→損傷要因の二種類のルートを用いて、損傷要因を推定する。この二種類のルートから得られた推論結果の論理積を採り、これをRBRにより推論された損傷要因(図6(a))とする。さらに、この損傷要因を外的要因、内的要因、作用力の三つに分類し、外的要因→補修・補強、内的要因→補修・補強、作用力→補修・補強の三種類のルートを用いて、補修・補強の対策を推定する。この三種類のルートから得られた推論結果の論理積を採ったものをRBRによる推論結果④(図6(b))とする。

以上の四種類の推論結果は複数なので、その中からより妥当な推論結果に絞り込むためには、様々な方法が考えられるが、どのような方法が最も適切であるか現段階では明確でない。著者らは、この問題に関して今後の研究によって解明しなければならない事項であると考え、本研究では、次の方法を採用した。それは、①で得られた結果は優先度が最も高く、次に、②と③との論理積による結果を優先する。そして、④は、①と先の論理積との結果の補填として用いる。よって、推論結果①と先の論理積の結果と結果④との論理和を検索プロセスの結果として採用する。

次に、検索結果に対する検証プロセスでは、検索プロセスで得られた最終結果が保持している補修、補強の対策目的を領域知識に置き換えて推論結果の同定を行う。これは、初級、中級技術者のユーザが検索プロセスで得られた結果の検証を行うことが難しいため、システムがユーザを支援することによって、半自動的にユーザが意思決定できる有効的な手段である。ここで、最終結果に矛盾がなければ、課題に対する対策は、ある程度有効であると判断され修正プロセスは省かれる。逆に、矛盾が生じれば入力された課題に問題があると判断され修正プロセスに進む。

修正プロセスでは、推論結果の課題と検証プロセスで得られた情報を参考にして自動的に候補となる課題を生成する。修正プロセスが終了すると、再度、そこで得られた課題を用いて検索プロセスが作動する。

4.2 評価・修復・格納

前節で得られた結果を基に、図4(b)の評価、修復、格納プロセスに進む。評価プロセスでは、事例が保持している特記事項(課題に対する対策が採用された経緯、たとえば、施工性、経済性、美観など)に関する領域知識を用いて、アトランダムな質問に対するユーザの回答を用いて、推論結果の同定を行う。そこで、結果の修復が必要と判断された場合、修復プロセスに、必要でないと判断された場合は、成功事例(課題に対して肯定された推論結果)として取り扱われ格納プロセスに進む。

修復プロセスでは、検証プロセスで得られた情報と評価プロセスで得られた情報から推論結果に対する微

小な修復を自動的に施し、候補となる結果を生成する。そこで、その結果、妥当性があれば成功事例(課題に対して肯定された推論結果の候補)として、妥当性がなければ失敗事例として取り扱い格納プロセスに進む。

格納プロセスでは、成功事例または失敗事例を新たな事例として事例データベースに格納する。ただし、失敗事例は、成功事例とは区別して管理される。また、成功事例、失敗事例を問わず新たな事例として格納するの必要がなければ事例データベースに格納しない。新たに格納された成功事例から容易にルール知識が獲得されるため、それをルールベースに反映させる。

5. システムの構築と実行

5.1 システムの構築

本システムは、オブジェクト指向型プログラミング(Object Oriented Programming: OOP)手法を採用して開発した。CBR部とRBR部の推論機構は、データとメソッド(処理)が一体化したオブジェクトで構成されており、また、課題と解もオブジェクトとして取り扱う。本システムで採用したオブジェクト指向型データモデルを図7に示す。このデータモデルでは、CBR部の事例ベースクラスと事例クラス、RBR部のルールベースクラスとルールクラス、そして課題クラスと解クラスの六種類のクラス定義から成る。

事例ベースクラスは、個々の事例データに相当するオブジェクトであり、サブクラスとして、橋梁概要クラス、損傷箇所クラス、損傷状態クラス、損傷要因クラス、補修・補強クラス、NOTEクラスから構成される。このうち、補修・補強クラスは、補修方法クラスと補強方法クラスをサブクラスとして持っている。これらのクラスは、それぞれ要素として、属性と属性値、および属性の特徴(インデックス)を保持している。事例クラスは、全ての事例ベースクラスを管理するオブジェクトであり、事例の検索・類似度の計算をメソッドで処理する。

ルールベースクラスは、個々のルールに相当するオブジェクトであり、要素としてルールの条件部と結論部から構成される。ルールクラスは、全てのルールベースクラスを管理するオブジェクトであり、前向き推論機構をメソッドとして定義している。

課題クラスは、要素として、課題の属性と属性値、メソッドとして課題の読み込みと課題の作成を保持し、また、解クラスでは、推論結果を管理するオブジェクトで構成されている。

5.2 システムの実行

実橋の損傷事例を用いて本システムを検証する。例として、1971年に損傷が発見された向島大橋と1979年に損傷が発見されたPolk County橋を採り上げる。

5.2.1 実行例1：向島大橋

向島大橋は、架設から3年で橋中央部の吊材取付部のガセットプレートと主桁上フランジの溶接部から、

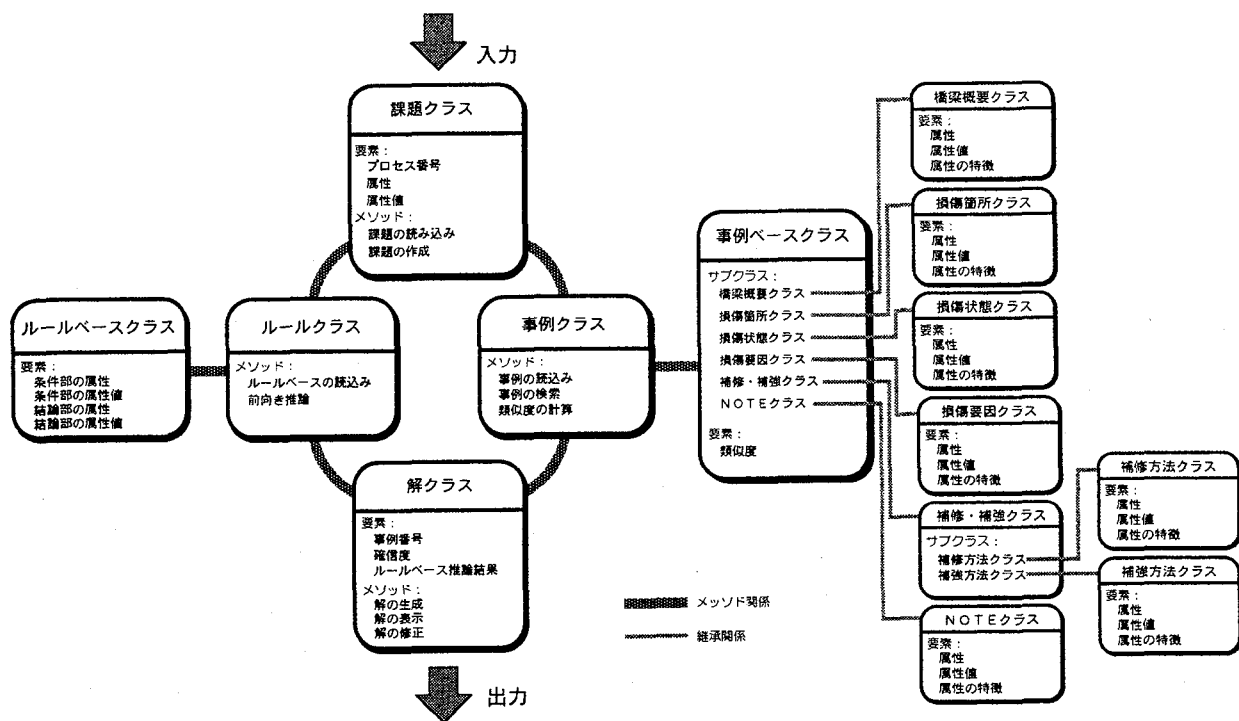


図7 システムにおけるオブジェクト指向型データモデル

主にガセットプレートに亀裂が発生した。そこで、本システムでは、入力項目として考えている課題、いわゆる現象を表1の課題欄(網かけ部)に示す。ここで、橋梁概要の項目では、経年数を0～5年、構造形式をランガー橋、損傷箇所の項目では、損傷位置を橋中央部、ブロックを主桁、サブブロックを吊材取付部、損傷部位を溶接部、部材をガセットプレートと主桁上フランジ、損傷部材をガセットプレート、溶接種類を隅肉溶接、損傷状態の項目では、損傷方向を垂直、亀裂様式を(d)とする。

まず、検索プロセスにおいて、推論結果①(図4(a))で導き出された類似事例から、原因である損傷要因の属性[外的要因, 内的要因と作用力]が推定される。ここでは、属性値として、[風による振動, 応力集中とT継手の作用力②], [ディテールの不適性, 2次応力とT継手の作用力③], [ディテールの不適性, 2次応力とT継手の作用力④]が推定された。この結果を基に、推論結果②を導き出す。

また、入力された課題の現象からRBR部を経由して、原因となる損傷要因を推定すると、[風による振動, 応力集中, T継手の作用力②]が得られた。この情報を基に推論結果③が導き出される。推論結果②と推論結果③との論理積を採り、この論理積と推論結果①から、事例1～17(表1)が推論結果として得られた。また、RBR部から推論結果④が導き出された。この推論結果を表1のRBR欄に示す。ここで、表中の記号“#”は属性値が無いことを意味する。

実際に、向島大橋の損傷に対する対策として、振動特性を改善する目的で、『ケーブルによる吊材相互の緊

結』による補強方法が採用されている。表1から分かるように事例1の『ケーブルによる吊材相互の緊結』が推論結果として得られている。また、RBRの推論結果として、補強方法に『ケーブルによる吊材相互の緊結』、補強目的に『振動特性の改善』が推論されていることから、推論結果が妥当であると言える。また、事例5と17では、同じ補強目的である『丸太による吊材相互の緊結』や『トリップワイヤー』の補強方法が得られている。このように、本システムでは、例化な推論結果も導くことができる。

5.2.2 実行例2: Polk County 橋

Polk County 橋は、架設から17年で横桁と主桁の連結部において主桁腹板と垂直補剛材の溶接部から、主に主桁腹板に亀裂が発生した。そこで、本システムでは、表2の課題欄(網かけ部)に示す入力項目を考える。橋梁概要の項目では、経年数を16～20年、構造形式を合成プレートガーダー橋、損傷箇所の項目では、ブロックを主桁、サブブロックを横桁と主桁の連結部、損傷部位を溶接部、部材を主桁腹板と垂直補剛材、損傷部材を主桁腹板、溶接種類を隅肉溶接、損傷状態の項目では、損傷方向を斜め、亀裂様式を(c)、損傷規模を中規模として考える。

まず、検索プロセスにおいて、推論結果①で導き出された類似事例から、損傷要因[横分配作用と面外方向変形, 2次応力の応力集中, T継手の作用力③]が推論された。この推論結果を基に推論結果②を導き出す。

また、入力された課題の現象からRBR部を経由して、原因となる損傷要因を推定すると、[横分配作用,

表1 実行結果の一例(向島大橋)

属性 事例	現象／橋梁概要							
	橋梁名	国名	架設年	供用開始年	損傷発見年	経年数	地域特性	構造形式
1	橋梁名不明	日本	1980	不明	1981	0～5	不明	ランガー橋
2	馬下橋	日本	不明	不明	不明	不明	水辺	ランガー橋
3	橋梁名不明	日本	1965	不明	1983	16～20	不明	ランガー橋
4	馬下橋	日本	不明	不明	不明	不明	水辺	ランガー橋
5	馬下橋	日本	不明	不明	不明	不明	水辺	ランガー橋
17	四徳大橋	日本	1976	不明	1977	0～5	不明	ランガー橋
RBR								
課題	向島大橋	日本	1968	不明	1971	0～5		ランガー橋

属性 事例	現象／損傷箇所							
	損傷位置	ブロック	サブブロック	損傷部位	損傷構造	部材	損傷部材	溶接種類
1	橋中央部	主桁	吊材端部	溶接部	吊材、吊材	吊材腹板、吊材フランジ	吊材腹板	隅肉溶接
2	端支点上	その他	吊材取付部	溶接部	補剛桁、補剛桁付加板	補剛桁上フランジ、ガセットプレート	補剛桁上フランジ	隅肉溶接
3	橋中央部	その他	吊材取付部	溶接部	補剛桁、補剛桁付加板	補剛桁上フランジ、ガセットプレート	補剛桁上フランジ	隅肉溶接
4	橋中央部	その他	吊材取付部	溶接部	補剛桁、補剛桁付加板	補剛桁上フランジ、ガセットプレート	補剛桁上フランジ	隅肉溶接
5	橋中央部	その他	吊材取付部	溶接部	補剛桁、補剛桁付加板	補剛桁上フランジ、ガセットプレート	補剛桁上フランジ	隅肉溶接
17	不明	その他	吊材取付部	一般部	補剛桁付加板		ガセットプレート	
RBR								
課題	橋中央部	主桁	吊材取付部	溶接部	主桁、主桁付加板	ガセットプレート、主桁上フランジ	ガセットプレート	隅肉溶接

属性 事例	現象／損傷状態				原因／損傷要因		
	損傷方向	亀裂様式	損傷規模	補修歴	外的要因	内的要因	作用力
1	平行	(c)	小	無	風による振動	応力集中	T継手の作用力②
2	平行	(d)	中	無	風による振動	応力集中	T継手の作用力②
3	垂直	(d)	中	無	風による振動	応力集中	T継手の作用力②
4	平行	(d)	中	無	風による振動	応力集中	T継手の作用力②
5	平行	(d)	中	無	風による振動	応力集中	T継手の作用力②
17	斜め	#	小	無	風による振動	応力集中	#
RBR					風による振動	応力集中	T継手の作用力②
課題	垂直	(d)		無	風による振動	応力集中	T継手の作用力②

属性 事例	対策／補修						対策／補強		確信度
	補修前処理	前処理目的	補修方法	補修目的	補修後処理	後処理目的	補強方法	補強目的	
1	カウジング	溶接ビードの除去	ストップホール	進展防止	グラインダ	表面の平滑化	ケーブルによる吊材相互の緊結	振動特性の改善	1.00
2							高力ボルトを用いた添接板	強度の向上	1.00
3									0.72
4							高力ボルトを用いた添接板	強度の向上	0.71
5							丸太による吊材相互の緊結	振動特性の改善	0.71
17	カウジング	溶接ビードの除去	再溶接	原形復旧			トリップワイヤー	振動特性の改善	0.67
RBR			再溶接	原形復旧	カウジング、グラインダ、ビートニング	表面の平滑化、表面の平滑化、面外変形の軽減	ケーブルによる吊材相互の緊結、高力ボルト、添接板	振動特性の改善、強度の向上、強度の向上	
課題							ケーブルによる吊材相互の緊結	振動特性の改善	

2次応力の応力集中、T継手の作用力③]が得られた。この情報を基に推論結果③が導き出される。推論結果②と推論結果③の論理積と推論結果①から、事例1～5の推論結果と推論結果④(RBR欄)が得られた。

実際に、Polk County橋の損傷に対する対策では、補修方法として、亀裂の進展防止のためにストップホールが設けられた。また、補強方法として、面外変形を

軽減させるために腹板ギャップの増大、強度の向上のために横桁と主桁フランジの連結が施された。表2から分かるように、事例2を除く全ての事例に、『ストップホール』が補修方法として得られており、事例3では、『横桁と主桁フランジの連結』が補強方法として得られている。また、RBRの推論結果として、補強方法の『腹板ギャップの増大』が得られており、CBRの推

表 2 実行結果の一例 (Polk County 橋)

属性 事例	現象／橋梁概要							
	橋 梁 名	国 名	架 設 年	供用開始年	損傷発見年	経 年 数	地 域 特 性	構 造 形 式
1	Chamberlain橋	米国	1952	不明	1973	20～	水辺	合成ﾌﾟﾚｰﾄｶﾞｰﾀﾞｰ橋
2	橋梁名不明	米国	不明	不明	不明	不明	不明	不明
3	Poplar Street橋	米国	1971	不明	1973	0～5	水辺	合成ﾌﾟﾚｰﾄｶﾞｰﾀﾞｰ橋
4	Poplar Street橋	米国	1971	不明	1975	0～5	水辺	合成ﾌﾟﾚｰﾄｶﾞｰﾀﾞｰ橋
5	カンザス川の橋	米国	1960	不明	1979	16～20	水辺	合成ﾌﾟﾚｰﾄｶﾞｰﾀﾞｰ橋
RBR								
課題	Polk County橋	米国	1962	1963	1979	16～20	都市	合成ﾌﾟﾚｰﾄｶﾞｰﾀﾞｰ橋

属性 事例	現象／損傷箇所							
	損傷位置	ﾌﾞﾛｯｸ	サブﾌﾞﾛｯｸ	損傷部位	損 傷 構 造	部 材	損 傷 部 材	溶接種類
1	橋中央部	主桁	対傾橋と主桁の連結部	溶接部	ﾀﾞｲﾔｸﾗﾑ, 主桁	主桁腹板, 垂直補剛材	隅肉溶接	隅肉溶接
2	不明	主桁	横橋と主桁の連結部	溶接部	主桁, 主桁付加板	主桁腹板, ｶﾞｰﾈｯﾄﾌﾟﾚｰﾄ	ｶﾞｰﾈｯﾄﾌﾟﾚｰﾄ	隅肉溶接
3	端支付近	主桁	横橋と主桁の連結部	溶接部	主桁, 主桁付加板	主桁腹板, 垂直補剛材	主桁腹板	隅肉溶接
4	負モーメント域	主桁	横橋と主桁の連結部	溶接部	横橋, 主桁	主桁腹板, 垂直補剛材	主桁腹板	隅肉溶接
5	不明	主桁	横橋と主桁の連結部	溶接部	主桁, 主桁付加板	主桁腹板, 垂直補剛材	主桁腹板	隅肉溶接
RBR								
課題	支点付近, 負モーメント域	主桁	横橋と主桁の連結部	溶接部	主桁, 主桁付加板	主桁腹板, 垂直補剛材	主桁腹板	隅肉溶接

属性 事例	現象／損傷状態				原因／損傷要因		
	損傷方向	亀裂様式	損傷規模	補修歴	外的要因	内的要因	作用力
1	平行	(b)	小	無	ﾃﾞｲﾚｰﾙの不適性, 面外方向変形	2次応力の応力集中	T継手の作用力③
2	垂直	(d)	小	無	ﾃﾞｲﾚｰﾙの不適性, 面外方向変形	2次応力の応力集中	T継手の作用力③
3	平行	(d)	中	無	ﾃﾞｲﾚｰﾙの不適性, 面外方向変形	2次応力の応力集中	T継手の作用力③
4	垂直	(a)	中	無	ﾃﾞｲﾚｰﾙの不適性, 面外方向変形	2次応力の応力集中	T継手の作用力③
5	平行	(a)	小	無	横分配作用	2次応力	T継手の作用力③
RBR					横分配作用	2次応力の応力集中	T継手の作用力③
課題	斜め	(c)	中	無	横分配作用, 面外方向変形	2次応力の応力集中	T継手の作用力③

属性 事例	対策／補修					対策／補強			確信度
	補修前処理	前処理目的	補修方法	補修目的	補修後処理	後処理目的	補 強 方 法	補 強 目 的	
1			ｽﾄｯﾌﾟﾈｰﾙ	進展防止			溶接(主桁ﾌﾗﾝｼﾞと垂直補剛材の上下端の溶接)	面外変形の軽減	0.71
2									0.71
3	ｶﾞﾗｼﾞﾝｸﾞ	亀裂部の除去	ｽﾄｯﾌﾟﾈｰﾙ, 再溶接(完全溶込み溶接)	進展防止, 原形復旧			横橋と主桁ﾌﾗﾝｼﾞの連結	強度の向上	0.55
4			ｽﾄｯﾌﾟﾈｰﾙ	進展防止			ｽﾄｯﾌﾟﾈｰﾙ	連結部の柔軟化	0.55
5			ｽﾄｯﾌﾟﾈｰﾙ	進展防止					0.21
RBR	ｶﾞﾗｼﾞﾝｸﾞ	溶接ﾋｰﾄﾞの除去	ｽﾄｯﾌﾟﾈｰﾙ, 再溶接	進展防止, 原形復旧	ｸﾞﾗｲﾝｸﾞ	表面の平滑化	腹板ｷｬｯﾌﾟの増大, 高力ﾋｰﾄﾞ, 添接板, 横橋と主桁ﾌﾗﾝｼﾞの連結, 対傾橋と主桁ﾌﾗﾝｼﾞの連結	面外変形の軽減, 強度の向上	
課題			ｽﾄｯﾌﾟﾈｰﾙ	進展防止	ｸﾞﾗｲﾝｸﾞ	表面の平滑化	腹板ｷｬｯﾌﾟの増大, 横橋と主桁ﾌﾗﾝｼﾞの連結	面外変形の軽減, 強度の向上	

論結果に補填されている。

6. あとがき

鋼道路橋の上部構造に発生する疲労亀裂を対象とした補修方法を選定するために、事例ベース推論(CBR)とルールベース推論(RBR)の手法を併用した診断型の知識ベースエキスパートシステム(KBES)を開発した。そこでは、CBRとRBRを併用した相補的な利用方法の利点をまとめ、システムの方針を明確にした。その考えを基に、ドメインの問題解決の側面とドメイン知識の拡張を考慮してCBRとRBRを併用するための

システム化への構想を述べた。また、システムを利用するユーザのレベルに応じた三種類のモードを設定し、システムの詳細仕様を検索、検証、修正プロセスと、評価、修復、格納プロセスに分けて設計した。そして、詳細設計に沿って、検索プロセスを中心にシステムを開発し、実橋の損傷事例を基にシステムの有効性を確認した。事例データの充実、ルールベースの拡張・洗練を行うことで、実用システムとして利用することが可能であると考えられる。今後は、詳細設計に沿って、検証、修正、評価、修復、格納プロセスを実現する。なお、本システムは、オブジェクト指向型言語C++を用いて、SUN S-4/2 GX上で構築した。

参考文献

- 1) 三上市藏・田中成典・倉地晶・米田慎二：鋼橋疲労損傷の補修方法選定システムにおける類推推論と負の学習の実現，構造工学論文集，土木学会，Vol.38A，pp.557-570，1992.3.
- 2) 三上市藏・田中成典・北岸秀一・神戸和仁：鋼橋疲労損傷の補修方法選定システムにおける知識の再利用，構造工学論文集，土木学会，Vol.38A，pp.529-542，1992.3..
- 3) Mikami, I., Tanaka, S., Kurachi, A.: Expert System with Learning Ability for Retrofitting Steel Bridges, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol.8, No.1, pp.88-102, 1994.1.
- 4) 田中成典・三上市藏・前田秀典：事例ベース推論を用いた鋼道路橋疲労損傷の補修方法の選定システム，第2回ファジィ土木応用シンポジウム講演論文集，日本ファジィ学会，pp.37-42，1994.12.
- 5) 小林重信：事例ベース推論の現状と展望，人工知能学会誌，Vol.7, No.4, pp.559-565，1992.6.
- 6) 松原仁：推論技術の観点からみた事例に基づく推論，人工知能学会誌，Vol.7, No.4, pp.567-575，1992.6.
- 7) 河野毅・末田直道・田中利一：CBR システムの構築環境，人工知能学会誌，Vol.9, No.1, pp.91-99，1994.1.
- 8) 奥田健三・山崎勝弘：事例ベース形推論とその応用例，情報処理，情報処理学会，Vol.31, No.2, pp.244-254，1990.2.
- 9) 寺野隆雄・鍋田茂子：事例ベース推論システムの効率に関する分析と評価，人工知能学会誌，Vol.8, No.4, pp.456-464，1993.6.
- 10) 中村考太郎：シガレット製造機の故障診断支援，人工知能学会誌，Vol.7, No.4, pp.576-581，1992.6.
- 11) 奥田健三・山崎勝弘：電力系統事故時復旧支援，人工知能学会誌，Vol.7, No.4, pp.582-586，1992.6.
- 12) 仲谷善雄・築山誠・福田豊生：事例ベース推論によるエレベータの設計支援，人工知能学会誌，Vol.7, No.4, pp.587-591，1992.6.
- 13) 服部雅一・田中利一・末田直道：事例ベース推論による機械設計，人工知能学会誌，Vol.7, No.4, pp.597-602，1992.6.
- 14) 吉浦裕：計算機室のレイアウト，人工知能学会誌，Vol.7, No.4, pp.592-596，1992.6.
- 15) 吉村晋・黄綿法・白鳥則郎：事例ベース推論を適用した通信ソフトウェア開発支援環境，人工知能学会誌，Vol.8, No.6, pp.713-716，1993.11.
- 16) 須田清隆・下川弘：事例推論を適用した計画支援システムの開発，第17回土木情報シンポジウム自由投稿・事例報告，土木学会，pp.95-98，1992.
- 17) Golding, A. R., Rosenbloom, P. S.: Improving Rule-Based Systems through Case-Based Reasoning, Proceedings of the 9th National Conference of Artificial Intelligence, AAAI, pp.22-27，1991.
- 18) 安信千津子・山田弘・源田晋司・鎌田芳栄：ルールベース推論と事例ベース推論の統合化の一方法，人工知能学会誌，Vol.7, No.6, pp.1087-1095，1992.11.
- 19) 大嶽能久・新田克己・前田茂・小野昌之・大崎宏・坂根清和：法的推論システム HELIC-II，情報処理学会論文誌，Vol.35, No.6, pp.986-996，1994.6.
- 20) 河野毅・濱田進・荒木大・小島昌一・田中利一：事例ベース推論によるエラー補修と知識獲得，人工知能学会誌，Vol.9, No.3, pp.408-416，1994.5.
- 21) Rissland, E. L., Skalak, D. B.: Combining Case-Based Reasoning and Rule-Based Reasoning; A Heuristic Approach, Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence, AAAI, pp.524-530, Aug., 1989.
- 22) 栗山健・寺野隆雄：RBR と CBR を統合したヘルプシステムの実現と評価，情報処理学会研究報告，Vol.93, No.17, pp.1-8，1993.3.
- 23) 高島文次郎・森田千絵・月本洋：論理の幾何的モデルに基づいたルールと事例の協調推論の枠組み，情報処理学会研究報告，Vol.93, No.54, pp.1-10，1993.6.
- 24) 岩井憲一・関谷正明・野村康雄・植田育男・溝口理一郎：知的医薬品設計エキスパートシステム IDDEX，情報処理学会論文誌，Vol.35, No.7, pp.1270-1223，1994.6.

(1994年9月14日受付)