

静的矛盾知識の検出修正システムを用いた鋼橋疲労損傷の補修方法選定知識の洗練

REFINEMENT OF KNOWLEDGE FOR RETROFITTING METHOD OF FATIGUE DAMAGE FACTOR IN STEEL BRIDGES USING DETECTION AND MODIFICATION SYSTEM OF STATIC INCONSISTENT KNOWLEDGE

田中成典* 三上市蔵** 前田秀典***

By Shigenori TANAKA, Ichizou MIKAMI, and Hidenori MAEDA

We have constructed expert systems which infer to select the retrofitting methods based on four kinds of factor for fatigue damage. The knowledge of both the retrofitting methods and four kinds of fatigue damage were collected from actual cases in steel bridges. The knowledge-base was represented by the causal-relation between the damage factors and the retrofitting methods.

It was found that inconsistent knowledge was statically included in the knowledge-base when knowledge-base was changed into the causal network model. They have studied to solve an important problem that the knowledge-base of the expert system has inconsistent knowledge.

In the present paper, we construct a system detecting and modifying static inconsistencies from the knowledge-base with causal network model. Using this system, we modify the knowledge-base to change uncertain knowledge into certain knowledge. As the result, the knowledge-base can be polished. This system is developed using the C language on the UNIX workstation.

1. まえがき

著者らは、鋼橋の疲労亀裂に関する損傷事例を収集・整理^{1)~3)}し、疲労亀裂に対する補修方法を選定する診断型エキスパートシステム^{2)~4)}を開発してきた。ここで扱われている知識ベースは、単純な2項間の因果関係で表現され、システム内部で因果ネットワークモデルとして形成される。知識ベースの構築方法については、知識の獲得において専門技術者から断片的な知識(因果関係の知識)を収集するだけで良く、知識整理の労力が低減できる。また、知識の追加、修正、削除も容易に行うことができる。しかし、知識ベースから自動的に因果ネットワークモデルを形成した段階で、知識ベースに矛盾が混在しているのが分かる。

知識ベースを構築する場合、一人の熟練技術者から獲得された専門知識を用いると、矛盾知識が混在することはあまり考えられないが、複数の熟練技術者の専門知識を用いると、個々の技術者の経験年数や経験知識がまちまちであるため、知識ベースに矛盾知識が混在することが予想される。知識ベース内に混在している矛盾知識の解消方法は、人工知能分野において避けることができない重要な研究テーマ^{5)~8)}である。

* 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); 元: (株)東洋情報システム

** 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)

*** 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)

矛盾は、動的矛盾と静的矛盾に分類することができる。前者は、推論時に初めて認識されるものであり、後者は、知識を整理した段階で認識できるものである。因果ネットワークモデル²⁾⁻⁴⁾を形成することによって発見できる矛盾は、静的矛盾に相当する。

動的矛盾の解消に関する研究には、TMS (Truth Maintenance System)の手法を用いた研究¹⁰⁾⁻¹³⁾がある。TMS手法は、事実と状態を共存させながら推論を進め、矛盾が検出されると、それまでの推論過程を探索アルゴリズムの1種であるバックトラック機能を用いて後戻りして、矛盾の原因となった状態を取り除き、矛盾のない解を導き出す。TMS手法の問題点は、導き出された解が全てでないため、局所解に陥っている可能性がある。TMS手法では、論理に基づく推論であるため、不完全な知識を用いて推論を行うことができない。たとえ推論を行ったとしても、精度の良い解を得ることはできない。そこで、不完全な知識を用いて推論を行うことができる仮説推論の手法を用いた研究¹⁴⁾⁻²⁷⁾がある。

仮説推論は、文字通り仮説を立てて推論を行うため幅の広い解が得られるが、矛盾した解が含まれている恐れがある。得られた解の無矛盾性を保つために、仮説推論にTMS手法を取り入れたATMS (Assumption-Based Truth Maintenance System)についての研究²⁸⁾⁻³⁹⁾も盛んである。

ATMS手法は、複数の仮説に基づく推論を単純な横型探索によって行い、最良の仮説を選択しながら推論を行う。これによって、推論を重複することを防いだり、効率的に無矛盾性を保つことができる。しかし、ATMS手法は、常に複数の仮説を管理しながら推論を行うため、膨大な推論時間が必要となる問題点が残る。そのため、推論時間の短縮を図った数々の高速化アルゴリズムが、考案³⁴⁾⁻³⁷⁾されてきた。また、高速化アルゴリズムに加え、並列処理手法の導入についての研究³⁸⁾⁻³⁹⁾も行われている。

静的矛盾の解消に関する研究としては、知識コンパイラによって矛盾を解消する研究⁴⁰⁾⁻⁴⁴⁾がある。知識コンパイラは、深い知識(原理原則知識)を利用して、浅い知識(経験知識)に相当する知識ベースを自動生成するものである。知識コンパイラの実用研究として、知識獲得支援システム⁴⁴⁾への適用がなされている。

著者らは、静的矛盾に関する研究⁴⁵⁾⁻⁴⁸⁾を進めてきた。静的矛盾を検出し解消することができれば、知識が洗練され、それに共い、動的矛盾の発生する確率を低減できると考えられる。動的矛盾はいずれ解消しなければならないが、その一手法は、すでに提案した。⁴⁷⁾

これまでの研究⁴⁵⁾⁻⁴⁸⁾によって、因果ネットワークモデルに発生している静的矛盾を検出し、静的矛盾を減少するように知識を改善するためのシステムを構築した。このシステムは、知識の真偽を考慮することができたが、曖昧量である因果関係の重みを有する知識を取り扱うことができなかった。通常の因果関係を用いた推論⁴⁸⁾では、矛盾が生じないと考えられているが、これは曖昧量や真偽などで因果関係の知識を表現していない場合の話で、曖昧量や真偽などを考慮すると静的矛盾の発生は避けられない。また、知識ベースを構築する場合、不成立(negative)な知識を獲得することは困難であり、成立(positive)する知識のみから構築される場合が多い。その場合、不明(unknown)な知識は、不成立(negative)な知識として取り扱われることになる。

そこで、本研究では、曖昧量や真偽を考慮した鋼橋疲労損傷の補修方法選定システムの知識ベースに対して、因果ネットワークモデル²⁾⁻⁴⁾を形成することによって、発見できる静的矛盾を検出修正し、知識の洗練を目指すシステムを構築する。この知識ベースは、成立(positive)する知識から構築されているため、不明(unknown)な知識を不成立(negative)な知識として取り扱うと静的矛盾が生じる。この静的矛盾を検出し解消すれば、不明(unknown)な知識が成立(positive)な知識として獲得することができる。構築したシステムに対して実行結果の妥当性を検討する。

2. 知識ベースと因果ネットワークモデル

著者らは、鋼道路橋の上部構造に発生する疲労亀裂を対象に、損傷事例を文献から収集・整理し、合計165ケースの事例データベースを作成した。^{1) - 3)} この事例データベースの知識を用いて、診断型知識ベースシステムである鋼橋疲労損傷の補修方法選定システム^{2) - 4)}を開発した。このシステム^{2) - 4)}では、亀裂の外的要因、亀裂の内的要因、継手の作用力、亀裂様式の4つの損傷要因を入力項目とし、補修方法を出力項目として考えている。また、2項間の因果関係の知識(亀裂の外的要因→補修方法、亀裂の外的要因→亀裂の内的要因、亀裂の内的要因→補修方法、亀裂の内的要因→継手の作用力、亀裂の外的要因→継手の作用力、継手の作用力→補修方法、亀裂様式→補修方法)から、知識ベースは構築されている。

この知識ベースの因果関係のうち「亀裂の外的要因→補修方法」、「亀裂の内的要因→補修方法」を例として表1に示す。この因果関係は、4種類の関係の重み(necessity, high possibility, possibility, low possibility)と、2種類の関係の真偽(positive, negative)で表現されており、知識として獲得されなかった2項間の因果関係は、unknownとして扱っている。表1の●印は、関係の重みが necessity で、真偽が positive であることを表している。同様に、◎印は、high possibility で positive、○印は、possibility で positive、△印は、low possibility で positive を表している。表中の空白は、unknownを表すが、以下では、low possibility で negative と扱う。この知識ベースから形成される因果ネットワークモデルは、図1ようになる。

表1 損傷要因から補修方法への因果関係

3. 静的矛盾

知識ベースが、2項間の因果関係として表現されている場合、この知識ベースから因果ネットワークモデルを形成すると、知識ベース中に矛盾が混在することがあり得る。このような、知識を整理した段階で認識できる矛盾は、静的矛盾と言われる。

因果関係の知識から因果ネットワークモデル(図2)が形成された場合を例に考える。この因果ネットワークモデルでは、Aをルート(根)としたツリー構造が成立している。この例では、ルートAからBを経由して、Dは肯定されており、一方、Eを経由してDは否定される。すなわち、ルートAを入力とし、Dを出力として考えた場合、A→Dという関係には、成立(positive)と不成立(negative)の2つの場合が共存しており、静的矛盾が発生していることになる。

	亀裂の外的要因											亀裂の内的要因				
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	風による振動	活荷重の作用	地震による振動	低温	横分配作用	ディテールの不適性	2次変形	材料不良	溶接不良	製作誤差	輸送架設荷重	応力集中	2次応力	2次応力の応力集中	応力集中による座屈	残留応力
補修方法																
1 ストップホール		◎		△	○	●	○		◎		○	○	●	●	△	
2 ガウジング					◎	●		△				○	●			
3 グラインダ	△	◎							○		○	○	○	●		
4 ビーニング		△							△			△				
5 腐板ギャップ増大					△	△								○		
6 腐板厚の増大						△									○	
7 切り抜き				△								△	△			
8 再溶接	△	●			●	●		△	○			○	●	◎		
9 フランジと補剛材を溶接					○							○				
10 両溶融		△						△				△				
11 補剛材付き溶接板								△							△	
12 高力ボルト	△	◎			○	○	△	△	○		△	○	○	○	●	
13 溶接板	△	●		△	△	○			○			○	○	○	○	
14 挿入板									△							
15 ケーブルによる吊材相互の緊結	△											△				
16 横桁と主桁のフランジ連結					●	○							○			
17 斜横桁と主桁のフランジ連結					○	○								△		
18 ダイヤグラムと主桁のフランジ連結					△	△								△		
19 横桁と7-リブのフランジ連結					△									△		
20 縦桁支承の交換												△				
21 主桁の交換		△						△				△				
22 連結板の交換				△								△				
23 新補剛材の設置	△				△					△		△				△
24 制振装置の設置											△	△				

● : necessity, positive ; ◎ : high possibility, positive ; ○ : possibility, positive ; △ : low possibility, positive ; 空白 : unknown.

4. 静的矛盾の検出と修正

曖昧量や真偽を考慮した2項間の単純な因果関係で表現された知識ベースから、因果ネットワークモデルを形成することによって発生する静的矛盾を検出し、静的矛盾が減少するように知識ベースを修正する方法を検討する。

知識ベースから、静的矛盾を減少させることができれば、知識が洗練され、知識ベースの精度が向上すると思われる。

図3に示す因果ネットワークモデルを例にして、静的矛盾の検出と修正の方法を考える。入力項目(A, B)、中間項目(C, D)と(E, F)、出力項目(X, Y)に対して、因果関係知識を図中の①～⑥のように設定する。①は入力項目(A, B)から出力項目(X, Y)へ向かう因果関係の知識で、②は入力項目(A, B)

から中間項目(C, D)へ、③は入力項目(A, B)から中間項目(E, F)へ、④は中間項目(C, D)から出力項目(X, Y)へ、⑤は中間項目(C, D)から中間項目(E, F)へ、⑥は中間項目(E, F)から出力項目(X, Y)へそれぞれ向かう因果関係の知識である。

4.1 検出方法

入力項目(A, B)から出力項目(X, Y)に至る経路は、①の経路、②と④を辿る経路、③と⑥を辿る経路、②と⑤と⑥を辿る経路の4通りが考えられる。①の経路は最も単純な経路であるため、この因果関係の知識を基準として考える。

複数の因果関係からなる経路の場合は、表2に基づく規則を使って、入力項目と出力項目の因果関係の重みを決定する。たとえば、 $\alpha \rightarrow \beta$ の関係の重みが◎印(high possibility, positive)で、 $\beta \rightarrow \gamma$ の関係の重みが○印(possibility, positive)の場合、 $\alpha \rightarrow \gamma$ の関係の重みは○印(possibility, positive)となる。

入力項目(A)から出力項目(Y)への②と④を辿る経路の場合は、 $A \rightarrow C \rightarrow Y$ と $A \rightarrow D \rightarrow Y$ の2つの経路がある。前者の場合、 $A \rightarrow C$ の因果関係が●印(necessity, positive)、 $C \rightarrow Y$ の因果関係が△印(low possibility, positive)であるから、表2を用いると、 $A \rightarrow Y$ の因果関係が△印(low possibility, positive)となる。後者の場合、 $A \rightarrow D$ の因果関係が○印(possibility, positive)、 $D \rightarrow Y$ の因果関係が△印(low possibility, positive)であるから、 $A \rightarrow Y$ の因果関係は、△印(low possibility, positive)

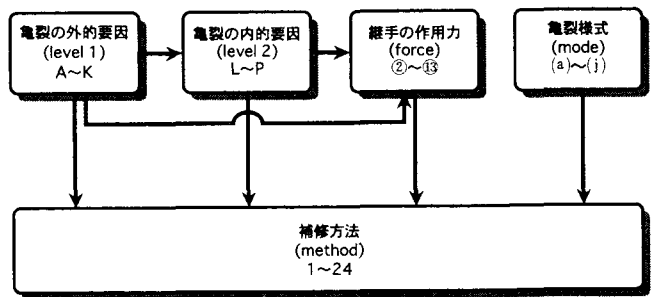


図1 因果ネットワークモデル

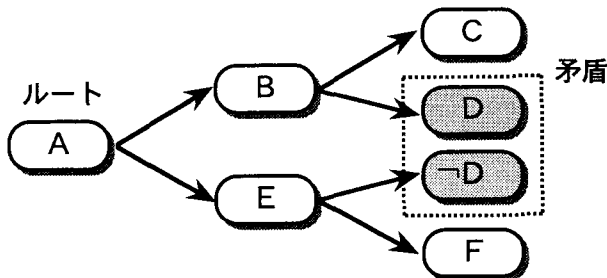


図2 静的矛盾

となる。したがって、 $A \rightarrow Y$ の因果関係は、△印(low possibility, positive)になる。このようにして②→④の経路に対して図4⑦が得られる。同様に、③→⑥の経路に対して図4⑧、②→⑤→⑥の経路に対して図4⑨が得られる。

このように、図4⑦、⑧、⑨を、基準の図3①とそれぞれ比較させると、 $A \rightarrow X$ の経路以外は、positiveとして得られる経路とnegativeとして得られる経路が混在していることが分かる。これらは図4⑩の網かけ部に示すように、静的矛盾の候補として検出される。まず、基準の関係が空白(negative)で、他の経路から得られる関係が成立(positive)になる場合、これを図4⑩の網かけ(▨)で示した。また、基準の関係が成立(positive)で、他の経路から得られる関係が空白(negative)になる場合、これを⑩の網かけ(▩)で示した。この2種の網かけが矛盾の候補であり、システムで検出できる。

4.2 修正方法

発見された静的矛盾の候補に対して、基準の因果関係の改善案は、次の3段階の方法を経て導くことにする。複数の因果関係からなる経路に対して、第1段階として、各経路において入力項目と出力項目の因果関係の重みが得られるが、この時入力項目から出力項目に辿り着くまで通過する因果関係の数(これを因果関係の深さと定義する)の影響を考慮して、関係の重みを修正する。第2段階として、各経路に対して得られた関係の重みを統合的に判断し、関係の重みを1つに決定する。これを合成された関係の重みと定義する。第3段階において、合成された関係の重みを基準の関係の重みと照合し、改善案を求める。

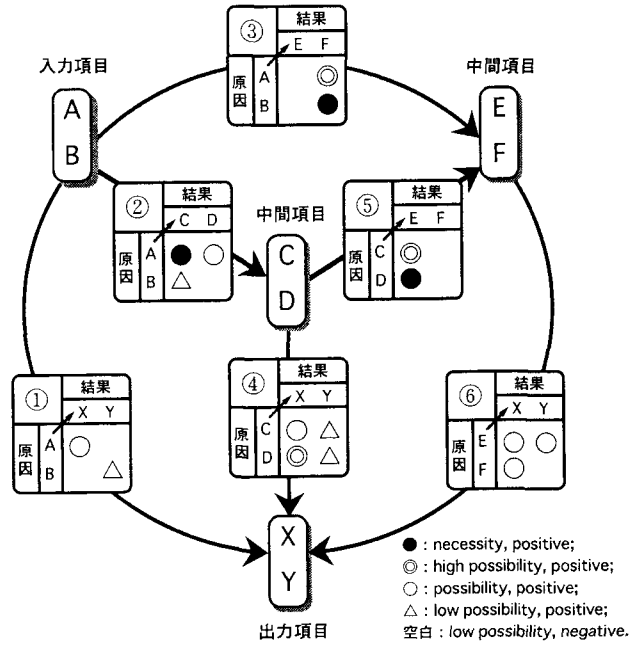


図3 ネットワークモデル

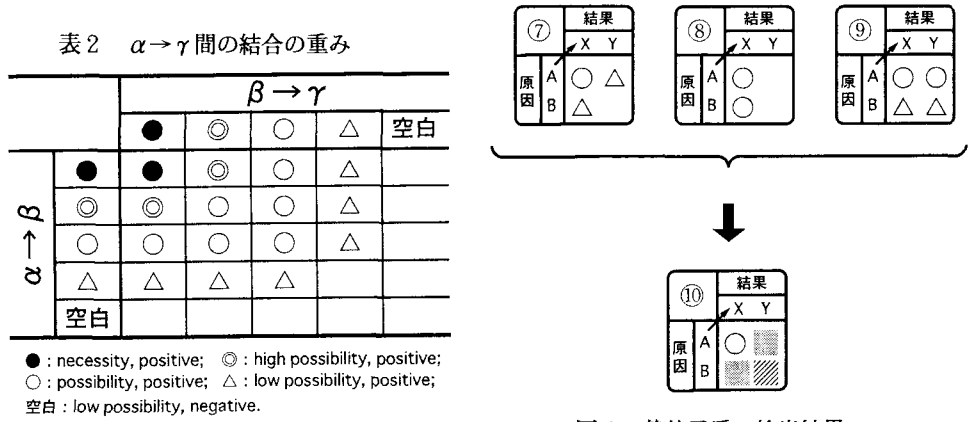


図4 静的矛盾の検出結果

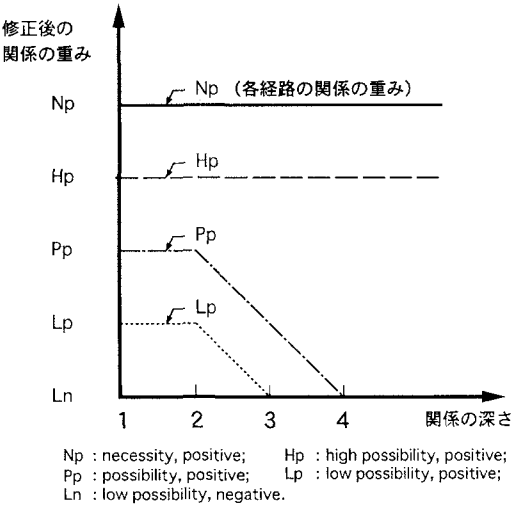


図5 因果関係の深さを考慮した関係の重み

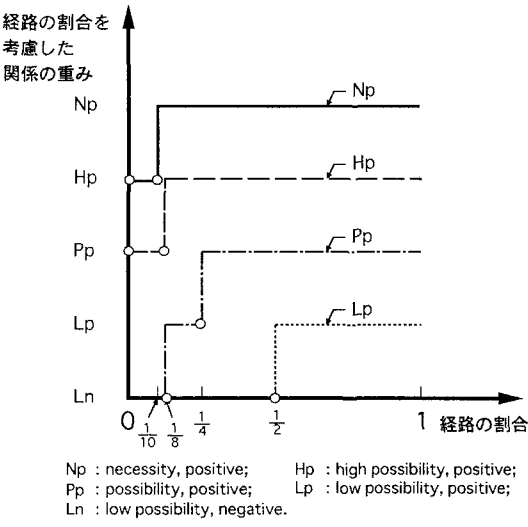


図6 経路の割合を考慮した関係の重み

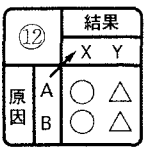
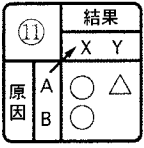
4. 2. 1 因果関係の深さの影響

1つの因果関係から得られた結果(基準の関係の結果)は、複数の因果関係を介して得られた結果よりも信頼性が高いと考えられる。そこで、因果関係の数が多い経路ほど、すなわち、因果関係の深さが増すほど、得られた結果の信頼性が低くなると考える。特に、関係の重みがあまり高くなく、○印(possibility, positive)や△印(low possibility, positive)の場合は、深さの影響を受けると考えられる。したがって、各経路の関係の重みを図5のように因果関係の深さを考慮して修正することにする。図中、“Np”はnecessity, positive, “Hp”はhigh possibility, positive, “Pp”はpossibility, positive, “Lp”はlow possibility, positive, “Ln”はlow possibility, negativeを表す。

表3 基準の関係の重みの改善案

		合成された関係の重み				
		●	◎	○	△	空白
基準の関係の重み	●	●	●	●	●	●
	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	○	○	○	○	○	○
	△	△	△	△	△	△
	空白	空白	空白	空白	空白	空白

● : necessity, positive; ◎ : high possibility, positive;
○ : possibility, positive; △ : low possibility, positive;
空白 : low possibility, negative.



専門家の知識獲得

図7 静的矛盾の修正結果

図5から分かるように、関係の重みが△印(low possibility, positive)で得られた経路では、因果関係の深さが3以上の場合、信頼性が低くなると考え、1ランク下げて空白(low possibility, negative)に修正する。○印(possibility, positive)の経路では、深さが3の場合は1ランク下げて△印(low possibility, positive)に、深さが4以上の場合は、さらに1ランク下げて空白(low possibility, negative)に修正する。●印(necessity, positive)、◎印(high possibility, positive)の経路では、信頼性があるものと考えて、因果関係の深さの影響は受けず、修正は行わない。

4.2.2 経路の数の影響

各経路の関係の重みが決定されると、それらを統合的に判断して合成される関係の重みを決定する。それには、 N_p から L_n の各重みに対して、それに相当する経路の数を考慮する。すなわち、ある経路から得られた関係の重みがある程度高くても、他の多くの経路で得られた関係の重みが低ければ、入力項目と出力項目の因果関係の重みは低いと考える。具体的には、経路の数は、全経路の数に対する割合で考え、関係の重みを、図6に示すように修正する。

たとえば、関係の重みが△印(low possibility, positive)として得られた経路が全経路の1/2未満の場合は、positive か negative か曖昧であるから、安全側に空白(low possibility, negative)として扱う。関係の重みが○印(possibility, positive)として得られた経路が、全体の1/4までの場合は、信頼性があると考え、1/4未満の場合は、関係の重みを1ランク下げる。1/8未満の場合は、さらに1ランク下げて空白(low possibility, negative)に修正する。

このようにして、 N_p から L_n の関係の重みがそれぞれ経路の割合を考慮した関係の重みに修正される。それらのうち、最も高いものを合成された関係の重みとして採用する。図3のネットワークモデルの場合は、図7⑪のように合成された関係の重みが得られる。

4.2.3 基準の関係の重みの改善

合成された関係の重みを、基準の関係の重みと比較し、表3の規則で基準の関係の重みに対する改善案を求める。

たとえば、図3①と図7⑪を比較すると、図7⑫が改善案として得られる。この改善案を専門家に提示して、専門家の知識を再獲得すれば、知識ベースの基本的因果関係の知識を更新することができる。

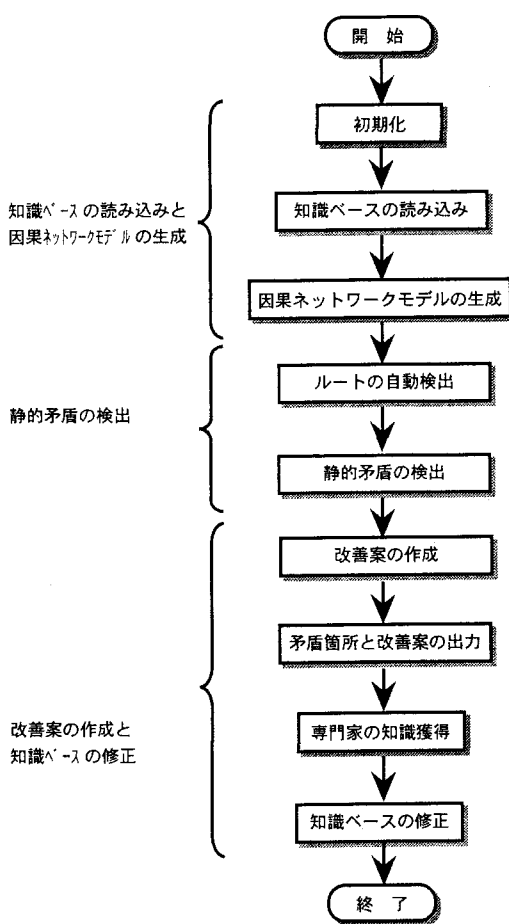


図8 検出修正システムの流れ

関係の重み	真偽	属性	属性値	真偽	属性	属性値
high possibility	positive	level 1	live load	positive	method	stop hole
low possibility	positive	level 1	low temperature	positive	method	stop hole
possibility	positive	level 1	load distribution	positive	method	stop hole
necessity	positive	level 1	defect of structural detail	positive	method	stop hole
possibility	positive	level 1	secondary deformation	positive	method	stop hole
high possibility	positive	level 1	welding defect	positive	method	stop hole
			⋮			

図9 読み込まれる知識ベースの一部

5. システムの構築

静的矛盾の検出修正システムの流れを図8に示す。まず、初期化を行った後、知識ベースを読み込み、因果ネットワークモデルを生成する。読み込まれる知識ベースの一部を図9に示す。第1項目は関係の重みを表し、第2～4項目は原因側の真偽、属性と属性値を表している。第5～7項目は結果側の真偽、属性と属性値を表している。真偽は、positive または negative を記述し、属性は、図1に示すように、亀裂の外的要因 (level 1)、亀裂の内的要因 (level 2)、継手の作用力 (force)、亀裂様式(mode)および、補修方法(method)を記述する。属性値は、各属性に対応する属性値、たとえば、亀裂の外的要因の場合、活荷重の作用 (live load) 等を記述する。

次に、因果ネットワークモデルのルートとなる入力項目を自動検出する。入力項目は、真偽、属性と属性値からなり、そこから、因果ネットワークモデルを前向きに辿り、最終的な出力項目(補修方法)に対する静的矛盾の検出を行う。まず、ルートとして自動検出された入力項目から出力項目へ至る全経路を表示する。次に各経路から得られる入力項目と出力項目の因果関係を表示する。4.1節で述べた方法によって、静的矛盾を検出し、静的矛盾の発生箇所を表示する。その後、4.2節で述べた方法によって、改善案を作成し表示する。

システムを実行することによって得られたこの改善案は、全てが正しいという訳ではない。そこで、改善案を参考にして、専門家が因果関係の知識の修正を行う。専門家自身が、知識の追加や削除を行い、自分自身の知識を見直し、誤りを訂正する。

6. システムの実行結果と評価

因果ネットワークモデル(図1)の「亀裂様式→補修方法」は、静的矛盾が生じないため議論から外す。そのため、静的矛盾の検出と修正との対象となる因果ネットワークモデルは、図10のようになる。

6.1 活荷重の作用

亀裂の外的要因「B 活荷重の作用」をルートとした場合、図10の経路番号(1)は、「B 活荷重の作用」と「補修方法」を結ぶ基準の因果関係であり、この因果関係の重みを表4の欄(1)に示す。これは、表1の欄Bの知識である。

次に、図10の経路番号(2)～(4)は、亀裂の外的要因→亀裂の内的要因→補修方法への経路、経路番号(5)～(8)は、亀裂の外的要因→継手の作用力→補修方法への経路、経路番号(9)～(21)は、亀裂の外的要因→亀裂の内的要因→継手の作用力→補修方法への経路である。ルートである「活荷重の作用」から経路(2)～(21)を用いて、補修方法へ前向きに辿った結果を表4の欄(2)～(21)に示す。

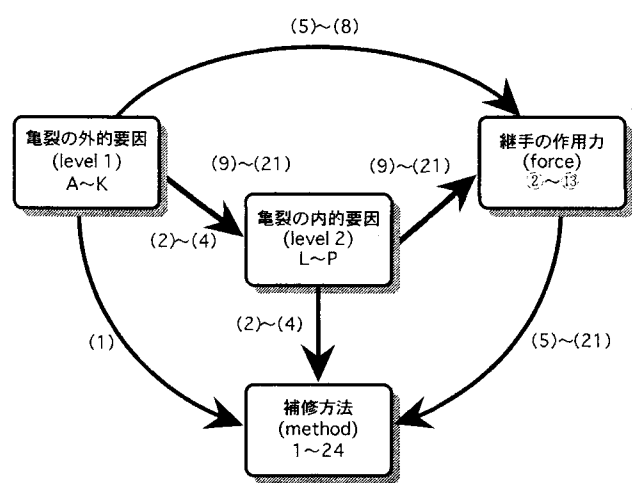


図10 矛盾の検出と修正の対象となるネットワークモデル

表4 活荷重の作用と補修方法の因果関係

補修方法	経路																				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)
1	●	○	●	●	○	●			○	△	△	△			○	●		○	●		
2		○	●			○			○	△	△	△			○	○			○		
3	○	○	△	●	○	○	△			△	○				○	○		○	○	△	
4	△	△	△		△	○		△	△		△			△	△			△			
5			○		△	△			△						△	△		△	△		
6						△										△			△		
7		△																			
8	●	○	●	○	○	●			○	△	△	△			○	●		○	●		
9			○		△	○			△	△					△	○		△	○		
10	△	△						△						△							
11										△						○			○		
12	○	○	○	●	○	●	△	○	○	△	○	○		○	○	●		○	●	△	△
13	●	○	△	○	○	○			○	△	△	△			○	○		○	○		
14		△																			
15		△			△				△						△			△			
16			●		○	○			○	△					△	○		△	○		
17			○		△	△			△						△	△		△	△		
18			△			△										△			△		
19			△			△										△				△	
20		△			△				△						△			△			
21	△	△						△						△							
22		△						△						△							
23		△					△				△					△				△	
24		△									△										

● : necessity, positive; ◎ : high possibility, positive; ○ : possibility, positive;
△ : low possibility, positive; 空白 : low possibility, negative.

表5 因果関係の深さを考慮した活荷重の作用と補修方法の因果関係

補修方法	経路																				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)
1	◎	○	●	●	○	●			△						◎	●		△	●		●
2		◎	△	●	○	◎			△						△	◎		△	◎		●
3	◎	△	●	●	○	◎	△			△					△	◎		△	◎		●
4	△	△			△			△													△
5			○		△	△															
6					△	△															
7		△																			
8	●	◎	●	◎	○	●			△						◎	●		△	●		●
9			◎		△	◎										△			△		
10	△	△					△							△							△
11						◎										△			△		
12	◎	◎	○	●	○	●	△	○	△		△	△		△	◎	●		△	◎		●
13	●	○	△	◎	○	◎			△						△	◎		△	◎		●
14		△																			
15		△			△																
16			●		◎	◎			△						◎	◎		△	◎		●
17			○		△	△															
18			△			△															
19			△			△															
20		△			△																
21	△	△					△														△
22		△					△														
23		△				△															
24		△																			

● : necessity, positive; ◎ : high possibility, positive; ○ : possibility, positive;
△ : low possibility, positive; 空白 : low possibility, negative.

経路(1)と他の経路(2)～(21)の結果を比較すると、表4の網かけ部において静的矛盾が発生していることが分かる。そこで、基準の因果関係の重みの改善案を4.2節で述べた方法で作成する。

6.1.1 因果関係の深さの影響

4.2.1項の方法で修正すると表5が得られる。たとえば、表4の1行目(補修方法:ストップホールの関係)では、図5より因果関係の深さが3つある経路(9)～(21)に対して、表5の1行目に示すように、関係の重みが○印(possibility, positive)から△印(low possibility, positive)に、△印(low possibility, positive)から空白(low possibility, negative)に修正される。

6.1.2 経路の数の影響

表5の経路(2)～(21)に対して、4.2.2項の方法で合成された関係の重みが決定される。たとえば、表5の1行目において、△印(low possibility, positive)以上の関係の重みが得られた経路は、10 経路存在する。全20経路に対する割合は 0.50 であるため、図6より、関係の重みは△印(low possibility, positive)と決定される。同様に、○印(possibility, positive)以上の関係の重みが得られた経路は8 経路、◎印(high possibility, positive)以上の関係の重みが得られた経路は6 経路、●印(necessity, positive)の関係の重みが得られた経路は5 経路で、それぞれの割合は 0.40, 0.30, 0.25 となり、図6より関係の重みが決定される。これらのうち最も高い重みを選択した場合、因果関係の深さと経路の数との影響を考慮した「活荷重の作用」と「ストップホール」の合成された関係の重みは●印と決定される。

6.1.3 基準の関係の重みの改善

合成された関係の重みと基準の関係の重みから、表3を用いると、改善案が得られる。たとえば、表5の「活荷重の作用」と「ストップホール」の関係では、●印の重みが改善案である。同様に、活荷重の作用と全ての補修方法(1~24)との因果関係に対して、改善案が表5の欄(案)のように得られる。

6.2 全損傷要因

全損傷要因(入力項目)と補修方法(出力項目)の因果関係に対して、システムを実行すると因果関係の改善案が表6のように得られる。元の因果関係(表1)と比較して、改善された因果関係が表6の網かけ部である。網かけ(▨)は、元は不明であった因果関係を表し、網かけ(▩)は、元の因果関係の重みが上がったことを示している。

6.3 システムの評価

改善された因果関係(表6)の妥当性を検討する。たとえば、亀裂の外的要因「A 風による振動」で生じた損傷には、「ストップホール」や「ガウジング」は有効な補修方法である。⁴⁹⁾ 表1では、これらの因果関係は不明(unknown)であった。システムの実行によって、これらの因果関係は○印(possibility, positive)の関係と見做して良いことが分かった。同様に、「B 活荷重の作用」→「2 ガウジング」、「G 2次的変形」→「5 腹板ギャップの増大」などの因果関係の知識が追加された。これらの追加された知識は、文献50)と51)より有益な知識であることが確認できる。

表6から、全般的にかなり高い可能性または、必然性を持つ関係に改善されていることが分かる。また、いずれの亀裂の外的要因、内的要因に対しても「1 ストップホール」、「8 再溶接」および「12 高力ボルト」による補修方法が有益であることが分かる。

表6 改善された損傷要因から補修方法への因果関係

補修方法	亀裂の外的要因											亀裂の内的要因				
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	○	▨	△	△	●	●	●	△	▨	○	▨	○	●	●	○	
2	○	●	△	△	○	●	●	△	▨	○	▨	○	●	○	○	
3	▨	△	△	△	○	○	●	△	▨	○	●	○	▨	●	○	△
4		△						△	△			△				
5					△	△	△						○			
6					△		△								○	
7				△					△			△				
8	▨	●	△	△	●	●	●	○	▨	○	▨	○	●	▨	○	
9			△		△	○	△				△		○	△	△	
10		△							△			△				
11			△				△	△			△		○	△	▨	
12	▨	●	△	○	●	●	●	▨	▨	▨	▨	○	●	●	○	△
13	▨	●	△	△	○	○	△	▨	○	○	○	○	▨	○	○	
14									△			△				
15	△											△				
16	△	●	△		●	●	●		●	△	○	△	●	○	○	
17					○	○	△						○			
18						△							△			
19						△							△			
20						△						△				
21		△							△			△				
22					△							△				
23	△					△				△		△				△
24										△		△				

● : necessity, positive ; ◎ : high possibility, positive ;
○ : possibility, positive ; △ : low possibility, positive ;
空白 : unknown.

7. あとがき

知識ベースが2項間の単純な因果関係の知識で表現されている場合、知識ベースから因果ネットワークモデルが形成されると、知識ベースに静的矛盾が混在していることが分かる。本研究では、関係の重みや真偽を考慮した静的矛盾知識の検出修正システムを構築した。本システムは、エンジニアリングワークステーション(富士通 S-4/2 GX)上で、C言語を用いて構築した。

本システムを鋼橋疲労損傷補修方法選定システム²⁾・⁴⁾で扱っている知識ベース^{1)・3)}に適用した結果、知識収集の際に不明であった知識の一部が獲得された。これによって、知識ベースの知識の精度が向上し、洗練された。

参 考 文 献

- 1) 三上市蔵・三木千壽・田中成典：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，構造工学論文集，Vol. 35A，pp. 977-990，1989. 3.
- 2) Ichizou Mikami, Shigenori Tanaka, Akira Kurachi: 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.
- 3) 三上市蔵・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，Vol. 38A，pp. 557-570，1992. 3.
- 4) 三上市蔵・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，Vol. 38A，pp. 529-542，1992. 3.
- 5) 白井良明：人工知能の理論，コロナ社，pp. 88-96，1992. 1.
- 6) 人工知能学会編：人工知能ハンドブック，オーム社，pp. 125-198，1990. 1.
- 7) 石塚 満・小林重信：電子，情報，通信編エキスパートシステム，丸善，pp. 193-230，1991. 9.
- 8) 小林重信・寺野隆雄：知識システムハンドブック，オーム社，pp. 1-88，1990. 11.
- 9) 情報処理学会編：情報処理ハンドブック，オーム社，pp. 1043-1128，1989. 5.
- 10) Jon Doyle: A Truth Maintenance System, Artificial Intelligence, Vol. 12, pp. 231-272, 1979. 4.
- 11) 奥乃 博・下國 治・田中英彦：二分決定グラフ(BDD)による真偽維持システムの実現，人工知能学会全国大会(第7回)論文集，pp. 87-90，1993. 7.
- 12) 山本幹雄・中川聖一：多重様相論理TMS，人工知能学会誌，Vol. 6, No. 3, pp. 397-406, 1991. 5.
- 13) 久野禎子・久野 靖：並列オブジェクト指向言語を用いたTMSの再構成，人工知能学会誌，Vol. 4, No. 1, pp. 62-69, 1989. 1.
- 14) 國藤 進：仮説推論，人工知能学会誌，Vol. 2, No. 1, pp. 22-29, 1987. 3.
- 15) 國藤 進・鶴巻宏治・古川康一：仮説選定機構の一実現法，人工知能学会誌，Vol. 1, No. 2, pp. 228-237, 1986. 12.
- 16) 石塚 満：仮説推論，日本ファジィ学会誌，Vol. 4, No. 4, pp. 620-630, 1992. 8.
- 17) 松田哲史・石塚 満：仮説推論システムの拡張知識表現と概念学習機構，人工知能学会誌，Vol. 3, No. 1, pp. 94-102, 1988. 1.
- 18) 石塚 満：不完全な知識の操作による高次人工知能機能と知識システム，知識情報処理ハンドブック，オーム社，pp. 113-130, 1988. 8.
- 19) 石塚 満：不完全な知識の操作による次世代知識ベース・システムへのアプローチ，人工知能学会誌，Vol. 3, No. 5, pp. 552-562, 1988. 9.
- 20) 赤間 清：論理的な制約表現を備えた拡張 Prolog，人工知能学会誌，Vol. 3, No. 5, pp. 581-589, 1988. 9.
- 21) 伊藤史朗・石塚 満：推論パスネットワークによる高速仮説推論システム，人工知能学会誌，Vol. 6, No. 4, pp. 501-509, 1991. 7.
- 22) 阿部明典・石塚 満：推論パスネットワーク上での類推による高速仮説推論システム，人工知能学会誌，

Vol. 7, No. 1, pp. 77-86, 1992. 1.

- 23) 松浦 聡・上原邦昭・前川禎男：仮説の生成と洗練化による理論形式へのアプローチ，情報処理学会，Vol. 92, No. 70, pp. 61-70, 1992. 9.
- 24) 牧野俊朗・石塚 満：経験に基づく学習による仮説推論の高速化，人工知能学会誌，Vol. 8, No. 3, pp. 320-327, 1993. 5.
- 25) 堂前宣夫・石塚 満：知識ベース・リフォメーションによる仮説推論システムの高速化，人工知能学会全国大会(第7回)論文集，pp. 67-70, 1993. 7.
- 26) 加藤昇平・笹木博久・伊藤英則：プログラム解析に基づく仮説推論の高速化技法，人工知能学会全国大会(第7回)論文集，pp. 75-78, 1993. 7.
- 27) 小泉善裕・前田 猛・川北 茂：プロダクションシステムにおける仮説推論の実現，人工知能学会全国大会(第7回)論文集，pp. 79-82, 1993. 7.
- 28) Johan de Kleer: An Assumption-Based TMS, Artificial Intelligence, Vol. 28, pp. 127-162, 1986. 3.
- 29) 劉 学敏・西田豊明・堂下修司：TMSの統合的自然言語理解への応用に関する考察，知識工学と人工知能，情報処理学会，No. 53, pp. 1-8, 1987. 7.
- 30) 董 方清・中川裕志：不確実な知識におけるATMS，人工知能学会誌，Vol. 3, No. 1, pp. 86-93, 1988. 1.
- 31) 矢澤利弘・篠原靖志：仮説に基づく推論における機械学習方式－目標概念の学習と矛盾の学習との融合－，情報処理研究，電力中央研究所，No. 17, pp. 33-42, 1990. 9.
- 32) 太田好彦・井上克巳：段階的前向き仮説推論システム，人工知能学会誌，Vol. 6, No. 4, pp. 532-544, 1991. 7.
- 33) 飛鳥井正道：Situating ATMS, 知識工学と人工知能，情報処理学会，No. 66, pp. 1-10, 1989. 9.
- 34) 赤植淳一：分類型問題に対する最適な仮説検証木の効率的な生成法：MINISTAR法，情報処理学会論文誌，Vol. 30, No. 9, pp. 1084-1091, 1989. 9.
- 35) 原 裕貴：最小矛盾の概念を用いた混合0-1整数計画問題の近似解法，人工知能学会誌，Vol. 8, No. 3, pp. 278-283, 1993. 5.
- 36) 奥乃 博：ATMSの高速化技法とその応用，人工知能学会誌，Vol. 6, No. 1, pp. 24-37, 1991. 1.
- 37) 太田好彦・井上克巳：ATMSを用いた前向き仮説推論システムにおける効率的な推論方式，人工知能学会誌，Vol. 6, No. 2, pp. 247-259, 1991. 3.
- 38) 横尾 真・石田 亨：ATMSを用いた分散制約充足問題の解法，情報処理学会論文誌，Vol. 31, No. 1, pp. 106-114, 1990. 1.
- 39) 奥乃 博：網：新しいATMSの処理系とその共有メモリ型マルチプロセッサ上での並列処理，人工知能学会誌，Vol. 5, No. 3, pp. 333-342, 1990. 5.
- 40) 山口高平・溝口理一郎・田岡直樹・小高 浩・野村康雄・角所 収：深い知識に基づく知識コンパイラの基本設計，人工知能学会誌，Vol. 2, No. 3, pp. 333-338, 1987. 9.
- 41) 小高 浩・野村康雄・田岡直樹・山口高平・溝口理一郎・角所 収：知識コンパイラの構成とその応用，知識工学と人工知能，情報処理学会，No. 48, pp. 9-16, 1986. 9.
- 42) 鶴田三郎・石塚 満：発想的知識生成のための命題論理知識ベースのコンパイル法，人工知能学会誌，Vol. 6, No. 1, pp. 117-123, 1991. 1.
- 43) 西岡真吾・池田 満・角所 収・溝口理一郎：ATMSに基づく問題解決システムにおける知識管理－仮定の取扱いと知識コンパイラ－，人工知能学会誌，Vol. 8, No. 4, pp. 465-475, 1993. 7.
- 44) 溝口理一郎・角所 収：知識獲得支援システム，人工知能学会誌，Vol. 3, No. 6, pp. 732-740, 1988. 11.
- 45) 三上市蔵・田中成典・米田慎二・前田秀典：因果ネットワークモデルに発生する静的矛盾知識の検出修正システム－鋼橋疲労損傷の補修方法選定知識の洗練－，構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，日本鋼構造協会，Vol. 17, pp. 19-24, 1993. 7.
- 46) 田中成典・三上市蔵・前田秀典・米田慎二：因果ネットワークモデルに混在する局所矛盾知識の検出修正システムを用いた知識の洗練，土木学会第48回年次学術講演会，pp. 1236-1237, 1993. 9.
- 47) 田中成典・三上市蔵・前田秀典：知識ベースシステムに混在する動的矛盾知識の取り扱いについて，第3回システム最適化に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp. 33-38, 1993. 12.
- 48) 房岡 璋・高橋和子：因果関係の推論システムについて，知識工学と人工知能，情報処理学会，No. 40, pp. 1-8, 1985. 5.

- 49) 西川和廣：道路構造物の損傷例，補修例－主として橋梁について－，道路，日本道路協会，pp. 44-48, 1982. 11.
- 50) 中井 博・堀川浩甫：鋼道路橋のリフォーム－疲労の立場から－，続・これからの道路，関西道路研究会，pp. 225-251, 1989. 11.
- 51) 岡田 清・今井宏典 監修：損傷と補修事例にみる道路橋のメンテナンス－阪神高速道路－，(財)阪神高速道路管理技術センター，pp. 155-160, 1993. 3.

(1993年 9 月16日受付)