

# 鋼橋架設の工法選定および安全管理支援 エキスパートシステムの開発

小西日出幸<sup>1</sup>・宮本文穂<sup>2</sup>・広兼道幸<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 日本橋梁(株) 技術部 (〒675-0164 兵庫県加古郡播磨町東新島3)

<sup>2</sup>正会員 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

<sup>3</sup>正会員 博士(工学) 関西大学助教授 総合情報学部 (〒569-1052 高槻市靈仙寺町2-1-1)

本研究は、鋼橋の計画時の架設工法選定および現場架設時の安全管理において利用できる、実用的なエキスパートシステムの開発を行ったものである。架設工法選定システムは、鋼プレートガーダー橋の一般的な架設工法を対象に与えられた架設条件から確信度を用いた推論を行い、適合する架設工法を推論結果として提示するシステムである。一方、安全管理システムは、現場で実際に行う架設工法を対象に、架設中の重大事故につながる要因のチェックを行うことにより、危険予知の推論結果と危険箇所の提示を行うシステムである。この二つのシステムの構築手法と実用性について述べる。また、最後に、二つのシステムの情報共有部分に着目した総合型システムへの発展性についても述べる。

**Key Words :** steel bridge, construction work, erection method, safety management, knowledge-based expert system

## 1. はじめに

人工知能の一つの応用技術であるエキスパートシステムは、土木の種々の分野においても開発が行われている<sup>1)~5)</sup>。橋梁架設における計画および施工管理業務は、とりわけ豊富な経験に基づく知識と判断が要求される。このような専門技術者の経験工学的な知識の若手技術者への継承は一般に困難を伴う。一方、技術の高度化および少子社会を背景とする若手技術者不足の傾向により、技術継承の問題は一層深刻化することが予想される。そこで、著者らは、橋梁架設における計画および施工管理業務支援のためのエキスパートシステム構築の研究を行ってきた<sup>6)</sup>。本論文ではその中から、架設計画に対して「鋼橋架設工法選定エキスパートシステム(以下、工法選定ESと略す)」、施工管理に対して「鋼橋架設における安全管理エキスパートシステム(以下、安全管理ESと略す)」それぞれの開発と実用化へ向けての取り組みについて論じるものである。

さらに、それぞれ独自に開発した二つのエキスパートシステムであるが、一連の業務の中で、後工程で利用する安全管理ESの知識には、工法選定ESを利用する前工程で提供すべき情報を持っていることに著者らは気づいた。そこで、二つのエキ

スパートシステムの情報共有部分に着目した総合型システムへの発展について最後に提案する。

鋼橋の架設工法選定過程には、橋梁形式、橋梁規模および架設地点などの情報に基づく多くの知識や経験の集約が必要である。それらの基本的知識をマニュアル化した選定フローチャートはあるが、専門家は多くの場合、マニュアルに頼ることなく豊富な経験に基づく知識を駆使して工法選定作業を行っている。しかし、初期の橋梁計画段階では架設の専門家でない、たとえば設計担当者が架設工法も含めた比較検討を行うことが要求される。工法選定ESはそのような状況での利用に適したシステムと考える。また、専門家が行った架設工法選定のチェックや、選定工法の妥当性の説明にも利用できると思う。なお、工法選定ESで対象とした工法は、従来一般的に用いられてきた工法に限定しており、自走台車一括架設工法などの一部の特殊工法は対象外としている。

一方、鋼橋架設時の安全管理については、まさに管理者の経験や知識が重要となる部分と考えられる。逆に考えれば、経験不足、知識不足によって事故が発生すると思われる。図-1に建設業における死亡者数の推移を示す<sup>7)</sup>。昭和47年の安全衛生法施行、昭和53年の建設省の指名停止処分の導入によってそれぞれ減少効果がみられるが、それ

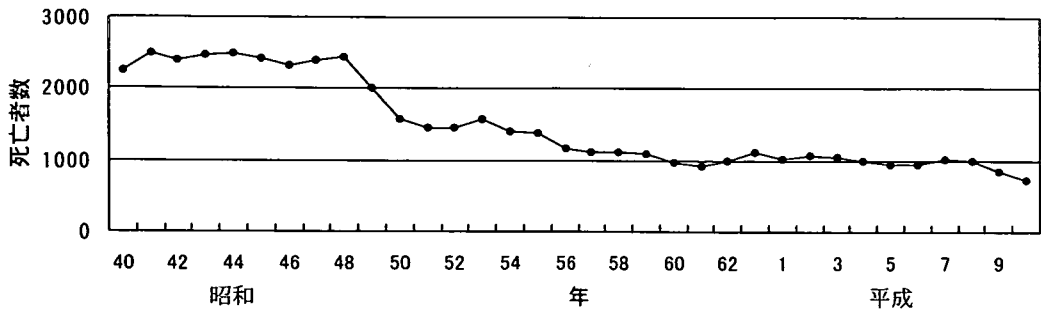


図-1 建設業における災害死亡者数の推移

以外では目立った減少はみられず横這い状態が続いている<sup>7)</sup>。規制中心型の安全管理手法の限界も指摘されており、切口の違った安全管理方法が模索されている<sup>8) 9)</sup>。

安全管理ESは架設工法別に重大事故を調査し、考えられる事故の要因を抽出し、それを知識ベースとした危険度診断型のエキスパートシステムである。本研究では、特殊な鋼橋架設工法の一つであり、かつ重大事故の発生頻度が比較的高い架設工法の一つである送出し架設工法における安全管理エキスパートシステムの開発例を述べる。

## 2. エキスパートシステム概論

### (1) 推論方式と確信度

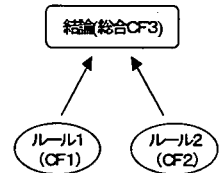
エキスパートシステムは、獲得した知識を一定の形式で格納されている「知識ベース」、知識ベースに基づいて推論を行う「推論エンジン」、およびユーザーとの応答を行い推論結果を提示する「ユーザーインターフェース」より構成される。知識の体系化は、種々の文献を調査、検討するとともに、独自に収集した事例を詳細に分析し、さらに専門家との討議を重ねることによって行った。

知識の表現形式は、「IF (条件部) ~ THEN (結論部)」というプロダクションルールを基本とした。知識の表現においては、完全に確実といえるものはむしろ少なく、あいまいさ指標の導入が必要となる。本システムではあいまいさの主観的度合いを数値で表現する確信度を用いた。確信度は、ルールの結論部が成立する度合いを-1.00から+1.00までの数値で表現するものである。絶対肯定の場合に+1.00を与え、絶対否定の場合-1.00を与える。この範囲の中間の値では、+1.00に近づくほど肯定の度合いが大きく、-1.00に近いほど否定の度合いが大きい。

表-1 comb法による確信度の計算方法

条件	計算式
CF1=+1.00 or CF2=+1.00	CF3=+1.00
CF1=-1.00 or CF2=-1.00	CF3=-1.00
CF1>0 and CF2>0	CF3=CF1+(1.0-CF1)×CF2
CF1<0 and CF2<0	CF3=CF1+(1.0+CF1)×CF2
CF1×CF2≤0	CF3=(CF1+CF2)/{1-min( CF1 ,  CF2 )}

CF1:集計を行う直前までの集計値(確信度)  
CF2:新しく成立したルールが与える確信度  
CF3:新しく確信度の集計値



### (2) 確信度の集計方法

確信度を扱う際に問題となるのは、二つ以上のルールが同一の結論部を持つ場合、総合的な確信度をどのように与えるかである。すなわち、確信度の集計方法である。総合的にどの程度の確信度を与えることが適切であるかを考慮することはシステムにとって重要なことである。確信度の集計方法としては一般に3通りの方法がある。以下にそれぞれの特徴を述べる。

#### a) 最大値選択法

この方法は、同一の結論部を持つ複数のルールによって、結論部に与えられた確信度の中で最大のものを選択し、その項目の確信度として与える。

#### b) comb法

この方法は、同一の結論部を持つ複数のルールによって結論部に与えられた確信度を表-1に示すように加算的に処理しその項目の確信度として与える。また、この方法は、1つの事象について成立するルール数が比較的小さい場合に適しており、加算的処理を行うため集計結果の違いがわかりやすく、また複数の項目がある場合どこから計算しても同じ結果を得ることができるといった特徴がある。しかし、結合数が多いほど得られる値が1

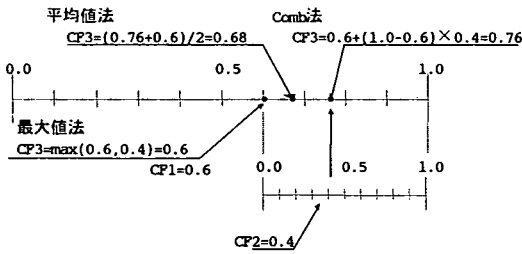


図-2 確信度集計方法の比較概念図

に近づいてしまうという欠点もある。

c) 平均値法

最大値選択法とcomb法で得られる値の平均値をその項目の確信度として扱う。1つの事象について、成立するルール数が比較的多い場合に適している。

確信度の集計方法の比較概念図を図-2に示す。この図は、同一の結論部を持つ二つのルール（確信度0.4および0.6）のcomb法による表-1に示す確信度集計計算の概念を図示したもので、最大値法による値と平均値による値との比較も示している。

3. 鋼橋架設工法選定エキスパートシステム

(1) システムの概要

工法選定ESは、橋梁形式として鋼桁および鋼箱桁を対象とし、一例として表-2に示すような選定要因から総合的に判断して架設工法を選定するエキスパートシステムである。本システムにおいては、推論結果である架設工法を、表-3に示すように、架設機械に着目した架設工法グループと、桁の支持方法に着目した分類の組み合わせによる5グループ12工法とした。これらの工法に該当しない工法は、特殊な工法と考えられるが、本システムでは、いずれの工法にも選定しえない条件の場合には、推論結果として「他工法との併用」が出力される。

(2) プロトタイプシステムの構築

a) 知識の整理

システムの構築にあたり、まず、一般に提供されている架設工法選定フローチャート<sup>10)</sup>などを基本とし、表-3の架設工法グループと架設工法の分類に整理し、図-3の鋼橋架設工法選定フローチャートを作成した。この図の点線で囲った部分は二重楕円丸で囲んだ架設工法グループの推論過程を示している。この架設工法グループは、表-3の架

表-2 架設工法選定要因の例

項目	要因
架設地点	架設地点の地形
	橋下の交差物
周辺の状況	桁下の利用
	作業ヤード
	上空障害物
	部材などの搬入路
橋梁本体	橋梁形式
	架設途中の安全性
架設機材	必要な架設機材の入手

表-3 工法選定ESで対象とした架設工法と分類

架設工法グループ	架設工法
トラッククレーン(TC)工法	トラッククレーンベント工法
	トラッククレーン一括架設工法
FC・台船工法	フローティングクレーンベント工法(可般式FC工法)
	フローティングクレーン一括架設工法
	台船一括架設工法
横取り併用工法	TCベント(横取り併用)工法
	TC一括架設(横取り併用)工法
送出し工法	手延式送出し工法
	架設桁送出し工法
	回転工法
ケーブル式工法	ケーブルクレーンベント工法
	ケーブルエレクション直吊り工法

設工法グループに対応している。丸付き数字を付した、四角で囲った項目は、推論における検討項目を示している。それぞれの検討項目について、どのような内容を確認し推論を行っているかをまとめたのが表-4に示す「鋼橋架設工法選定フローチャートの確認事項」である。例えば、③跨線橋という検討項目には、「1. 橋軸方向と線路の交差角」と「2. 夜間閉鎖・起電停止」という2つの確認事項がある。1つ目の確認事項、橋軸方向と線路の交差角では角度が45°以下か45°以上かの選択肢があり、この選択結果が知識データとなる。このようにして知識の整理を行った。

これらの知識をシステムとして構築するにあたり、さらに以下の2つの条件を付加した。

①確認事項の条件が不明な場合は類推または仮定により必ずデータを与える。したがって推論結果

表-4 鋼橋架設工法選定フローチャートの確認事項

検討項目	確認事項	選別肢				
		陸上	河上	鉄道	河川(高水敷)	河川(治水防)・湖沼・池
①架設地点	1.架設地点	陸上	河上	鉄道	河川(高水敷)	河川(治水防)・湖沼・池
②桁下条件	1.桁下条件	平坦地	道路	鉄道	河川(高水敷)	河川(治水防)・湖沼・池
③荷重係	1.橋軸方向と線路の交差角	45°以下	45°以上			
	2.夜間荷重・起電停止	不可能	可能			
	3.可車両の通行	可能	補強が必要			不可能
④トカカシの敷入路	2.直線、平直線形、緩急勾配	適否	改良が必要			不可能
	3.橋梁、圧木、架設機等の支障物	無し	移設・撤去可能			移設・撤去不可能
	4.架設機等へのトカカシの接近・据付	可能	整備が必要			不可能
⑤トカカシの作業ヤード	2.トカカシの組立ヤード	有り	整備が必要			不可能
	3.トカカシの据付に対する地耐力	有り	補強が必要			不可能
	4.架空線、埋設物等の支障物	無し	移設・撤去可能			移設・撤去不可能
	5.併用中道路の通行規制	全面通行止可能	一部通行止可能			通行止不可能
	6.掘削し・仮設橋脚の設置による水害利用	可能(補償無)	可能(補償有)			不可能
⑥掘削の利用	2.掘削し・仮設橋脚の設置	掘削し	仮設橋脚			不可能
	3.掘削し・仮設橋脚の規模	小規模	中規模			不可能
	4.掘削し・仮設橋脚の規模	小規模	中規模			不可能
⑦ベント設備	1.Aベント設置位置への作業車輛の接近・据付	可能	整備が必要			不可能
	2.Bベント設置位置の地形	平坦地	整地が必要			整地不可能
	3.Aベント設置位置における埋設物、水路等の支障物	無し	移設・撤去可能			移設・撤去不可能
	4.ベント基礎	枕木・敷鉄板	コンクリート			
⑧水中ベント設備	5.ベントの高さ	H≤10m	10m<H≤30m			
	1.水中ベントの設置による水面利用	可能(補償無)	可能(補償有)			不可能
	2.仮設盛土	基礎杭(15m以下)	基礎杭(15m以上)			施工不可能
⑨トカカシによる一括架設	3.水中ベントの高さ	H≤10m	10m<H≤30m			
	1.橋桁の組立ヤード	有り	整備が必要			造成不可能
	2.大型トカカシの調達	可能(容易)	可能(困難)			不可能
⑩水面利用	1.架設地点における水面利用	可能(補償無)	可能(補償有)			不可能
	2.進入経路における水面利用	可能(補償無)	可能(補償有)			不可能
⑪FC・台船の架設地点	1.架設地点の上空支障物	無し	移設・撤去可能			移設・撤去不可能
	2.航路条件	航路設定無し	航路閉鎖が可能			航路閉鎖不可能
⑫FC・台船の進入経路	1.進入経路における水面利用	可能(補償無)	可能(補償有)			不可能
	2.進入経路の水深	4m以上	4m以下(浚渫可能)			4m以下(浚渫不可)
	3.進入経路の上空支障物	無し	移設・撤去可能			移設・撤去不可能
	4.進入経路における既設橋梁の桁下空間	余裕有り	改良が必要			改良不可能
⑬FC・台船一括架設	1.架設地点の水深	4m以上	4m以下(浚渫可能)			4m以下(浚渫不可)
	2.架設地点の流速、潮流	2/7以下	2/7以上			
	3.クレーン能力の調達	可能(近辺)	可能(遠方)			不可能
	4.橋桁の組立ヤード・搬出し設備(岸壁、揚重設備等)	近辺	遠方		無し	
	5.桁下から水面までの高さ	7m以下	7m以上			
⑭可搬式FC	1.架設地点の水深	2m以上	2m以下(浚渫可能)			2m以下(浚渫不可)
	2.可搬式FCの組立・解体ヤード	有り	整地が必要			造成不可能
	3.組立ヤードまでの橋桁、可搬式FCの搬入および作業車輛の進入	可能	整備が必要			不可能
	4.送り出しヤードの確保	可能	整備が必要			不可能
⑮送り出しヤード	2.送り出しヤードまでの橋桁、架設資材の搬入および作業車輛の進入	可能	整備が必要			不可能
	3.送り出しヤードと送り出す方向との関係	同一方向	別方向			
	4.隣接既設橋の礎断勾配	i≤5%	D5%			
	5.主桁平面形状	直線	R≥500m		R<500m	
⑯主桁断面形状	2.主桁断面形状	等断面	変断面			
	3.主桁礎断勾配	i≤5%	D5%			
	⑰ベント・トカカシ鉄塔設備	1.鉄塔の設置ハース	有り	整備が必要		整備不可能
⑱ベント・トカカシ7カ設備	2.鉄塔設置位置への作業車輛の接近・据付	可能	整備が必要			不可能
	3.鉄塔基部の地耐力または構造物の強度	有り	補強が必要			補強不可能
	4.架空線、空域制限等の支障物	無し	移設・撤去可能			移設・撤去不可能
	1.7カ設備による周辺道路、家屋等に対する支障	無し	支障が軽微		支障が多大	
⑲荷取りヤード	2.7カ設備位置への作業機械の接近	可能	整備が必要			不可能
	3.7カ設備の種類	コンクリートポンプ	グラウトポンプ(7-ス)		グラウトポンプ(8-カ)	
	4.地下水	無し	低水位		高水位	
⑳荷取りヤード	1.荷取りヤードの確保	橋台背後	桁下			造成不可能
	2.荷取りヤードまでの橋桁等の搬入および作業車輛の進入	可能	整備が必要			不可能

はこれらの仮定が条件となる。

②複数径間の場合は単径間ごとに本システムを適用する。

b) 知識の表現方法

本システムの構築において、知識のモデル化は、プロダクションルールによる知識の表現に適しており、かつ知識の入力が容易に行える表-5に示す形式により行った。すなわち、表-4の確認事項を条件部、選定候補である架設工法を結論部とし、

それぞれの関連性を表-6に示す適正度に合わせた記号によって表現した。表-5は表-4の確認事項における⑦-1.「ベント設置位置への作業車輛の接近、据付」と12種類の架設工法との関連をモデル化したものである。例えば、「車両の接近、据付」が「不可能」であれば①、③、⑪の架設工法は不適であり(×で表示)、②、④、⑫の工法が適していること(◎で表示)を表現している。このように適性を段階評価し、記号で表現すると知識の



表-7 comb法による確信度の結合回数と集計値の関係

確信度	結 合 回 数												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0.90	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.80	0.96	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.70	0.91	0.97	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.60	0.84	0.94	0.97	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.50	0.75	0.88	0.94	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.40	0.64	0.78	0.87	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
0.30	0.51	0.66	0.76	0.83	0.88	0.92	0.94	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99
0.20	0.36	0.49	0.59	0.67	0.74	0.79	0.83	0.87	0.89	0.91	0.93	0.95	0.96
0.10	0.19	0.27	0.34	0.41	0.47	0.52	0.57	0.61	0.65	0.69	0.72	0.75	0.77

表-8 各適性度に対応する確信度の基本設定値

適性度	記号	確信度設定値
適	◎	+0.30
やや適	○	+0.15
無関係	(空白)	0.00
やや不適	△	-0.15~-0.30
不適	×	-1.00

モデル化に都合がよい。

本システムでは、プロダクションルールによる知識のあいまいさを表現するために、前述したように、確信度を用いている。いま、記号◎における確信度を+0.9と仮定した場合、例えば、表-5の知識の中において、③トラッククレーンベント工法（以下、トラッククレーンをTCと略す）に対して、「もし“ベント設置位置への作業車両の接近、据付”が“可能”であるならば、架設工法は“TCベント工法”である。（確信度=+0.9）」といったルールで表現できる。

一般に、同じ事象を結論部に持つ複数の知識が同時に成立した場合の確信度は、それぞれの確信度の値を集計計算することにより求められる。確信度の集計計算方法には最大値選択法、comb法、平均値法の3つの方法があることは2章（2）で述べた。本システムでは、一つの条件によって複数の結論部を評価する必要があるため、複数回の結合計算を行う場合にどの順序で行っても同じ値が得られるcomb法を採用している。

c) 確信度の設定

確信度の設定にあたり、まず表-6の各適性度に対し、「適」～「やや不適」を表す記号「◎」～「△」にはあいまいさを表す確信度値-1.0～+1.0の中間の値を、「不適」を表す「×」には絶対否定の-1.0を設定することとした。「◎」～「△」のあいまいさを表す確信度の具体的な値を設定するにあたり、まず、その設定範囲を把握することに主眼をおき、最終結果で得られる確信度がほぼ

妥当な集計値となるように、確信度の上下限値を設定することとした。

本システムを実行した場合、1つの結論となる架設工法が得られるまでに成立するルール数は後述する表-10の右端欄に示す確認事項数に一致する。例えば、TCベント工法では、検討項目④、⑤、⑦、⑧のそれぞれの確認事項数の総和16となる。

このようにルール数は4～16で、平均はほぼ10となる。次に、表-7に示した確信度値の結合回数と集計値の関係をみてみると、各質問に対する確信度値の最大値を+0.3程度に押さえて結合すれば、ある工法に対する推論過程において10回程程度の確認事項の質問すべてに「適」と回答した場合において、確信度の集計値が+1.00に近い値が得られ、

「適」でない項目が増えるにしたがって+1.00より小さくなっていくため、システム構築上都合がよいといえる。また、「やや不適」に対応するマイナス側の確信度についても、同様にその最小値を-0.3として、-0.15~-0.3の範囲で設定し、「無関係」に対する確信度は、確信度集計値が増幅しないように0.00に設定した。また「やや適」については+0.30と0.00の中間値+0.15に設定した。以上の設定より、妥当な結合結果が得られた。各適性度に対応した確信度の基本設定値をまとめると表-8のようになる。

d) プロトタイプシステムの問題点

以上のような構築手法によりプロトタイプシステムが構築できたが、事例による推論結果を検討した結果、以下のような問題点が明確となった。

- ①複数の架設工法候補が選択された場合、各工法間に、評価上有効な差異が生じない場合が多い。
- ②各架設工法に対する確認事項（質問）数のばらつきが推論結果である確信度に直接影響を及ぼすため、複数の推論結果である確信度集計値に対する相対的評価が困難である。

次節に述べるシステムの効率化と実用化を行いながら、これらの問題点の解決を図った。

表-9 親工法と子工法による架設工法の分類

親工法名	属する子工法名	選定対象となる架設工法 (親工法と子工法の組合せ)
TC	ベント	TCベント工法
	一括架設	TC一括架設
横取り併用	ベント	TCベント(横取り併用)
	一括架設	TC一括架設(横取り併用)
FC・台船	一括架設	FC一括架設
		台船一括架設
可搬式FC	ベント	FCベント工法
送出し		回転工法
		手延式送出し工法
		架設桁送出し工法
ケーブルクレーン	ベント	ケーブルエレクションベント
		ケーブルエレクション直吊り

表-10 親工法と子工法および検討項目の一覧表

親工法名	対応する検討項目	属する子工法名	対応する検討項目	選定対象となる架設工法 (親工法と子工法の組合せ)	対応する確認事項数
TC	④⑤ (⑥)	ベント	⑦⑧	TCベント工法	16 (19)
		一括架設	⑨	TC一括架設	10 (13)
横取り併用	③	ベント	⑦	TCベント(横取り併用)	7
		一括架設	⑨	TC一括架設(横取り併用)	4
FC・台船	⑩⑪⑫	一括架設	⑬	FC一括架設	13
				台船一括架設	13
可搬式FC	⑩⑬⑭	ベント	⑧	FCベント	10
送出し	⑮		⑮⑯	回転工法	4
				手延式送出し工法	7
				架設桁送出し工法	7
ケーブルクレーン	⑰⑱⑲	ベント	⑰⑱	ケーブルクレーンベント	15
				ケーブルエレクション直吊り	15

注) 検討項目⑥は桁下条件が河川(流水部)の場合のみに対応する。

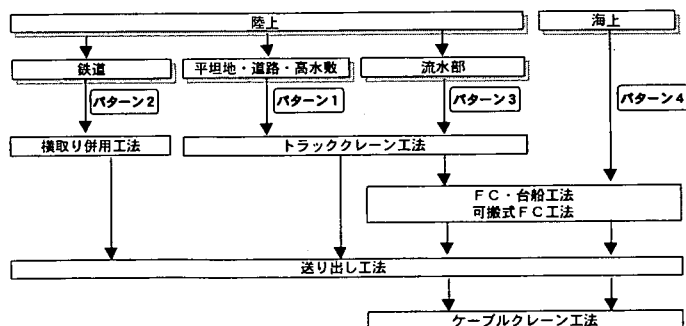


図-4 検討パターンによる架設工法グループのしぼり込み

### (3) 実用的システムの構築

#### a) 検討対象工法のしぼり込みによる効率化

システムの推論過程において、対象工法12工法すべてに対して全項目の検討を行うことは非効率である。表-3の5つのグループの中で、FCベント工法は可搬式であるため、他の2工法とは異なる特徴をもつ。そこで、まず、可搬式FCというグ

ループを1つ設けて、表-9に示すように6つのグループに分類し直した。このグループを便宜上、「親工法」と呼ぶ。ベント工法か、一括工法かなどの分類工法を「親工法」に対し、「子工法」と呼ぶ。推論過程の効率化を図るため、全12種類の選定対象となる架設工法を「親工法」と「子工法」の組み合わせた工法として表現し、表-9のよ

表-11 確認事項の評価結果による検討項目の一覧表

評価の 記号	意味	条件
『A』	適	検討項目の確認事項すべてが◎、 又は1つ○でその他すべてが◎。
『B』	可能	『A』『C』『D』いずれにも 該当しないもの。
『C』	困難	検討項目内の確認事項の過半数が △、ただし×はない。
『D』	不可	検討項目内の確認事項の中に 1つでも×がある。

うに整理した。このことにより、図-4に示すように、工法の効率的なしぼり込みが可能となった。

まず、親工法を表-4の検討項目「①架設地点条件」および、「②桁下条件」の選択肢により4つの検討パターンにしぼり、検討する子工法のしぼり込みを行っている。この検討工法のしぼり込みにより、推論にかかる時間が短縮でき、より実用的なシステムに改善できた。

#### b) 推論過程の整理と確信度の調整

a) で表-4の検討項目①と②により検討する親工法の対象を4パターンにしぼった。次に、③～⑯の検討項目を親工法に対する検討項目と、12種類の架設工法に対する検討項目に分類した。分類結果は表-10の通りである。この分類の方法は、図-3の鋼橋架設工法選定フローチャートにおける終点である各選定工法（12種類）に至る直前の検討項目を、選定対象となる架設工法（12種類）に対する検討項目とし、その他の該当検討項目は親工法に対する検討項目とした。例えば、TCベント工法では、フローチャートにおける終点「TCベント工法」の直前の検討項目「⑧水中ベント設備」と「⑦ベント設備」が検討項目となり、その他の検討項目「⑥桁下の利用」、「⑤作業ヤード」、「④搬入路」が親工法（TC工法）に対する検討項目となる。

それぞれの検討項目には、表-4に示したように複数の確認事項があり、その数は1～5個となっており、ばらつきがある。そこで、検討項目を複数の確認事項の評価内容によって4段階評価を行うこととした。その評価方法を表-11に示す。ここで、条件の適性度記号は表-4の確認事項（③～⑯）の選択肢欄において、左から順に◎、○、△、×とおいたものに対応させたものである。

このように、推論過程の階層化手法により、推論結果である選定架設工法は、確認事項の数に直接影響を受けなくなった。したがって、各検討項目に対する確認事項を追加する場合や新規に検討項目を設定する場合、システムの知識ベースの修

表-12 検討項目評価による親工法  
(架設工法グループ)の確信度

検討 項目の 評価 ランク	親工法 がもつ 全検討 項目数	評価対象 の親工法 に与える 確信度	評価対象外の親工法に 与える確信度	
			先行 グループ	後続 グループ
『A』	1	0.90	-0.10	-0.70
	2	0.69	-0.05	-0.45
	3	0.54	-0.04	-0.33
『B』	1	0.60	-0.05	-0.60
	2	0.37	-0.03	-0.37
	3	0.26	-0.02	-0.26
『C』	1	0.30	0.05	0.05
	2	0.17	0.03	0.03
	3	0.12	0.02	0.02
『D』	1	-1.00	0.10	0.10
	2	-1.00	0.10	0.10
	3	-1.00	0.10	0.10

注) 対象グループ：検討項目の対象となる親工法  
先行グループ：対象親工法よりも先に推論される親工法  
後続グループ：対象親工法よりも後に推論される親工法

正、追加の取り扱いが比較的容易に行えるようになった。

検討項目が親工法に与える確信度を検討項目の評価ランクに応じて表-12のように設定した。親工法に対する検討項目は表-10に示したように1～3個と一定ではないため、検討項目が複数個ある場合には、検討項目が1個であるときの確信度と同程度となる値を確信度のcomb法による結合結果から逆算して設定した。また、検討項目の評価点として、対象としている親工法に高い確信度が与えられた場合には、対象外の親工法にはマイナスの確信度を、逆に対象としている親工法にマイナスの確信度が与えられた場合には、対象外の親工法にはプラスの確信度を設定するようにした。この確信度の値は、後述するサンプルデータにより、妥当と思われる推論結果（各工法に対する確信度の集計値）が得られるように、試行錯誤により調整しながら求めた。この手法によって、親工法に対する検討項目数がみかけ上統一され、検討項目数の差異による確信度の影響を排除することが可能となった。さらに、親工法の選定フローチャートの流れ、すなわち推論順序は、経済性の優位な工法が先行するため、対象外の工法に与える確信度の値を、表-12のように先行グループと後続グループに差を付すことにより経済性の反映を考慮した。

以上の手法により、確信度の結合回数に影響を受けない架設工法グループの推論システムの構築が可能となった。



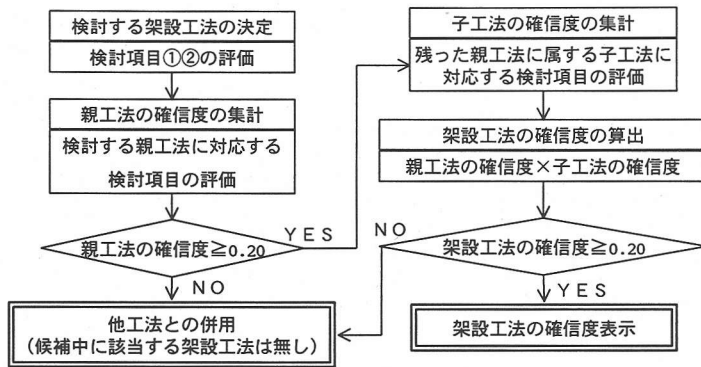


図-5 分割評価による推論過程のフロー



図-6 タイトル画面

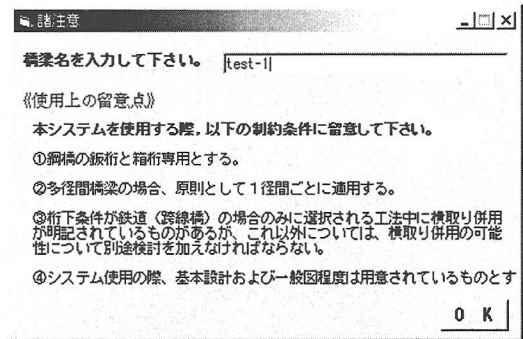


図-7 使用上の諸注意画面

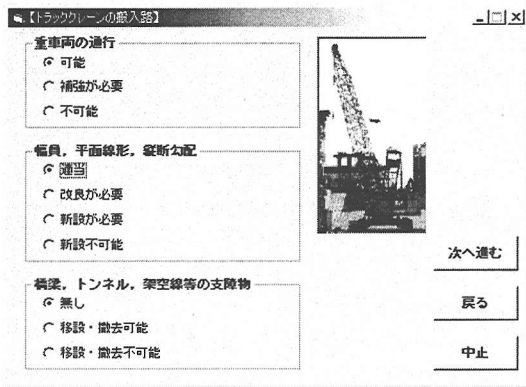


図-8 質問画面例1

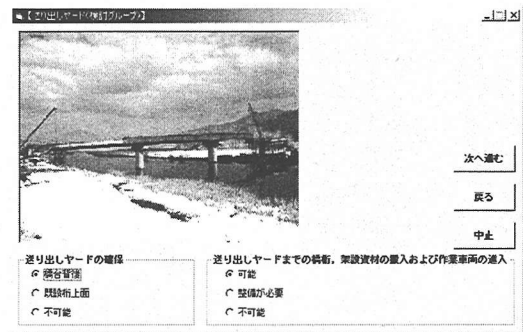


図-9 質問画面例2

### c) 架設工法の分割評価

さらに入力の効率化のため、最終的な架設工法選定に至る過程において、確信度の評価を2分割で行う方法を採用した。手順は以下の通りである。

まず、表-10の親工法6グループの確信度を集計し、この値が基準値として設定した+0.2以上を満足した場合のみ子工法の確信度の集計を行う。そして、親工法と子工法のそれぞれの確信度の集計値をさらに結合した確信度値がすなわち、本シ

テムにおけるその架設工法の確信度となる。

図-4におけるパターン1またはパターン3によって、TC工法にしぼられた場合の推論過程を図-5に示す。まず、TC工法（親工法）の確信度を集計する（表-4の検討項目④および⑤の評価）。この値が+0.2以上の場合、ベント工法および一括架設工法（子工法）の確信度の集計を行う（表-4の検討項目⑦および⑨の評価）。親工法と子工法のそれぞれ計算された確信度の値をかけ合わせた値がTCベント工法およびTC一括架設工法の確信度とする。親工法の確信度が+0.2未満となった場合は、選定工法の対象としてこの親工法を排除す

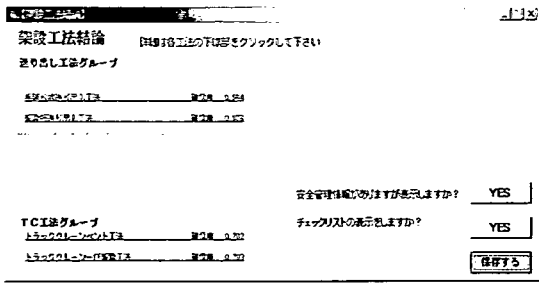


図-10 結論画面例

A工法 - 履歴 -	
トラッククレーンベント工法	0.782
トラッククレーンの搬入路	0.69
トラッククレーンの作業ヤード	0.69
送り出しヤード(検討グループ)	-0.1
ケーブルクレーン鉄塔設備	-0.04
ケーブルクレーンアンカー設備	-0.04
荷取りヤード	-0.04
ベント設備	0.9
トラッククレーンによる一括架設	-0.1

戻る 中止

図-11 推論履歴画面例

る。したがって、この親工法に属する子工法の検討は、この時点で排除される。この手法により、質問数のしぼり込みが可能となり、効率化が図れた。

#### d) 画面表示による推論過程

パソコン上でシステムを起動させるとまずタイトル画面(図-6)が表示される。画面上の“推論開始”を選択すると、次に使用上の諸注意(制約条件)が示され(図-7)、質問画面に入る。質問画面は、表-4の確認事項の選択肢によるものであるが、検討項目ごとに確認事項をまとめて表示し、質問画面の数を少なくするよう配慮した。また、前述した通り、推論過程で不要となった質問は省略される。検討項目「トラッククレーンの搬入路」に関する質問画面例を図-8に、「送り出しヤード」に関する質問画面例を図-9に示す。質問画面には、ユーザーに対して質問内容の理解補助のために参照写真を貼り付け、インターフェースのレベルアップを図った。

質問画面表示によるすべての入力完了すると推論結果である結論画面が図-10のように表示される。また、推論の履歴についても図-11のように表示させ、推論過程においてどの項目がどの程度推論結果に影響しているかを示すようにした。

#### (4) システムの評価

システムの構築にあたり、前節(3)で詳述した確信度の調整作業のためにサンプルデータを準備した。サンプルデータは、実際に架設中または架設完了した工事を事例とし、採用された架設工法および表-4の確認事項である架設条件データをまとめたものである。

このサンプルデータをもとに、システムの推論結果の比較を繰り返し、表-12の確信度を設定した。サンプルデータは13ケース用意した。その一部を表-13に示す。本システムでの推論結果を検証した結果を表-14に示す。この表において、サンプルデータ欄の各ケースの下にかっこ内で表示された条

件は、表-4の「②桁下条件」である。表-14に示すように、13ケース中、10ケースについては実際に採用された架設工法が最も上位にランクされた。本システムの推論結果と実際に採用された架設工法が一致しなかった2例(ケース7およびケース10)は、特殊な条件下で行われた架設工事であったと考えられた。また、ケース12-1、12-2は同一橋梁で異なる径間について適用した例である。ケース12-2ではFCベント工法がTCベント工法より若干優位の結果となっているが、実際の工事では、仮設備など工事全体で総合的に判断されてTCベント工法が採用されている。正解率はほぼ80%であり、前述した内容を考慮した上で、本システムの信頼性は高いものであると評価した。

#### 4. 鋼橋架設における安全管理エキスパートシステム

##### (1) システムの概要

過去に発生した鋼橋架設中の重大事故について、その原因を文献等により調査すると、直接的な単一の原因のみによるものではなく、いくつかの複合要因により発生していることがわかる。直接的な原因を特定できない場合もある。いわゆるハイリッヒの法則によると、死亡事故、小さい事故および事故に至らなかったミスのそれぞれの事象数の比率は1:29:300になるという。起こった事故は水山の一角で、その現場には不安全要素が多く存在するとはよく言われる。

架設現場における熟練の技術者、監督者たちは、豊富な経験に基づく知識から、事故要因を未然に摘み取っていると思われる。一つのミスが発生し

表-13 サンプルデータ一覧表 (一部)

検討項目	確認事項	ケース5	ケース7	ケース10	ケース12-1	ケース12-2
①架設地点	1.架設地点	陸上	陸上	陸上	陸上	陸上
②桁下条件	1.桁下条件	平坦地	河川(流水部) ・湖沼・池	河川(流水部) ・湖沼・池	鉄道	河川(流水部) ・湖沼・池
③跨線橋	1.橋軸方向と線路の交差角 2.夜間閉鎖・起立停止				45°以上 不可能	
④トッカレンの 搬入路	1.重車両の通行 2.幅員、平面線形、縦断勾配 3.橋梁、トカ、架空線等の支障物	可能	補強が必要 新設が必要	補強が必要 新設が必要	可能 適当	補強が必要 新設が必要
⑤トッカレンの 作業ヤード	1.架設区間へのトッカレンの接近・据付 2.トッカレンの組立ヤード 3.トッカレンの据付に対する地耐力 4.架空線、埋設物等の支障物 5.併用中道路の通行規制	無し 有り 有り 無し	無し 不可能 有り	無し 有り 有り 無し	移設・撤去不可能 橋台背後 造設が必要 有り	無し 有り 有り 無し
⑥桁下の利	1.瀬回し・仮設棧橋の設置による水面利用 2.瀬回し・仮設棧橋の設置 3.瀬回し・仮設棧橋の規模			可能(補償無) 瀬回し 小規模		可能(補償有) 仮設棧橋 大規模
⑦ベン設備	1.ベン設置位置への作業車輛の接近・据付 2.ベン設置位置の地形 3.ベン設置位置における埋設物、水路等の 支障物 4.ベン基礎 5.ベンの高さ	可能 平坦地 無し 枕木・敷鉄板 H≤10m			不可能 整地不可能 移設・撤去不可能 杭基礎 H≤10m	
⑧水中ベン設備	1.水中ベンの設置による水面利用 2.水中ベン基礎 3.水中ベンの高さ		可能(補償無) 仮設盛土 10m<H≤30m	可能(補償無) 仮設盛土 10m<H≤30m		可能(補償有) 基礎杭(15m以下) 10m<H≤30m
⑨トッカレンによ る一括架設	1.橋桁の組立ヤード 2.大型トッカレンの調達	有り 可能(容易)		造設不可能	有り 可能(困難)	有り 不可能
⑩水面利用	1.架設地点における水面利用 2.進入経路における水面利用		不可能	不可能		可能(補償有)
⑪FC・台船の 架設地点	1.架設地点の上空支障物 2.航路条件					無し 航路設定無し
⑫FC・台船の 進入経路	1.進入経路における水面利用 2.進入経路の水深 3.進入経路の上空支障物 4.進入経路における既設橋梁の桁下空間					4m以下(水深可能) 無し 余裕有り
⑬FC・台船 一括架設	1.架設地点の水深 2.架設地点の流速、潮流 3.クレン能力の調達 4.橋桁の組立ヤード・浜出し設備 (岸壁、揚重設備等) 5.桁下から水面までの高さ					4m以下(水深可能) 2ノット以下 可能(近辺) 近辺 7m以上
⑭可搬式FC	1.架設地点の水深 2.可搬式FCの組立・解体ヤード 3.組立ヤードまでの橋桁、架設資材の 搬入および作業車輛の進入					2m以上 有り 可能
⑮送り出しヤード	1.送り出しヤードの確保 2.送り出しヤードまでの橋桁、架設資材の 搬入および作業車輛の進入 3.送り出しヤードと送り出す方向との関係 4.隣接既設桁の縦断勾配	既設桁上面 可能	不可能	不可能	橋台背後 可能	既設桁上面 可能
⑯主桁形状	1.主桁平面形状 2.主桁断面形状 3.主桁縦断勾配	直線 等断面 i≤5%			i≤5% R≥500m 等断面 i≤5%	i≤5% 直線 等断面 i≤5%
⑰クレン 鉄塔設備	1.鉄塔の設置スペース 2.鉄塔設置位置への作業車輛の接近・据付 3.鉄塔基部の地耐力または構造物の強度 4.架空線、空域制限等の支障物	整備不可能	有り	有り 有り 無し	有り 整備が必要 有り 無し	有り 可能 補強が必要 無し
⑱クレン アンカ設備	1.アンカ設備による周辺道路、家屋等に 対する支障 2.アンカ設置位置への作業機械の接近 3.アンカ設備の種類 4.地下水			不可能		支障が多 可能 高水位
⑲荷取りヤード	1.荷取りヤードの確保 2.荷取りヤードまでの橋桁等の搬入および 作業車輛の進入		整備が必要	桁下		橋台背後 可能

ても、事故に至る連鎖を断ち切っていれば、事故に至る可能性も低くすることができると考えられる。

本研究における安全管理ESは、現場における専門技術者の安全管理上の知識を知識ベースとして、事故要因の連鎖による事故発生を防止することを目的として構築したシステムである。

事故要因は架設工法ごとに特異性を有している

ため、架設工法ごとにシステムを構築するのが都合がよい。そこで、比較的特殊な工法ともいえるケーブルエレクション斜吊り工法および送出し架設工法を対象にシステム構築を行った。両工法とも、重大事故の発生頻度が比較的高い。近年発生したケーブルエレクション斜吊り工法での架設中の重大事故としては、1992年12月に起こった広島県尾道市の鋼上路アーチ橋の落橋事故、1994年12

表-14 サンプルデータによる推論結果の検証

サンプルデータ	推 論 結 果		実際に採用された架設工法
	架 設 工 法	確 信 度	
ケース1 (平坦地)	トラッククレーンベント	0.80	トラッククレーンベント
	トラッククレーン一括架設	0.75	
	手延式送出し	0.63	
	架設桁送出し	0.42	
ケース2 (流水部)	ケーブルクレーンベント	0.81	ケーブルクレーンベント
ケース3 (流水部)	トラッククレーンベント	0.68	トラッククレーンベント
ケース4 (鉄道)	手延式送出し	0.81	手延式送出し
	架設桁送出し	0.54	
ケース5 (流水部)	FCベント	0.39	FCベント
	トラッククレーンベント	0.37	
	FC一括架設	0.30	
ケース6 (道路)	手延式送出し	0.58	手延式送出し
	トラッククレーンベント	0.56	
	架設桁送出し	0.39	
ケース7 (鉄道)	他工法との併用	1.00	回転工法
ケース8 (鉄道)	ケーブルクレーンベント	0.37	ケーブルクレーンベント
ケース9 (流水部)	ケーブルクレーンベント	0.42	ケーブルクレーンベント
	ケーブルエレクション直吊り	0.21	
ケース10 (平坦地)	架設桁送出し	0.84	手延式送出し
ケース11 (高水敷)	トラッククレーンベント	0.54	トラッククレーンベント
ケース12-1 (高水敷)	トラッククレーンベント	0.68	トラッククレーンベント
	手延式送出し	0.59	
	架設桁送出し	0.39	
ケース12-2 (流水部)	FCベント	0.40	トラッククレーンベント
	トラッククレーンベント	0.39	
	手延式送出し	0.20	

月に起こった奈良県吉野郡の鋼ニールセンローゼ橋の落橋事故が上げられる。送出し架設工法での架設中の事故としては、1997年9月に起こった、北海道千歳市での桁落下事故がまだ記憶に新しい<sup>11)</sup>。本論文では、一例として送出し架設に対する安全管理エキスパートシステムの開発について述べる。このシステムは、架設現場における、重大事故につながる事故要因を知識ベースとし、現場の現状または想定状態を入力することにより、重大事故に至る危険度を予測し、また危険箇所をチェックするシステムとなっている。知識ベースとした事故要因については、事故に関する記事<sup>12)</sup>や文献調査<sup>13)</sup>、専門家への意見聴取、および事故当事者や調査にあたった当該者へのインタビューなどを通じて獲得した。

## (2) 送出し架設工法安全管理システム

### a) 事故発生要因の抽出と階層化

送出し架設工法の代表的なフローとして、システム構築用の架設フローを図-12のように作成した。このフローの中で、特に送出し架設工法における安全管理上重要となる工程は、①～⑤の番号を付した工程であると考え、この5段階の架設工程ごとに事故発生要因とチェック内容を抽出した。その一部を表-15に示す。この表に示す確信度記号および重要度は表-16, 17に対応する。

本安全管理ESでは桁送出し作業時の事故発生を対象とした。次に、架設設備に着目すると、手延べ設備、送出し設備および軌条・台車設備がそれぞれ独立した設備として分類できる。表-15の事故発生要因を設備分類で整理した図が図-13である。この図は、桁送出し作業時の事故発生を最上位と

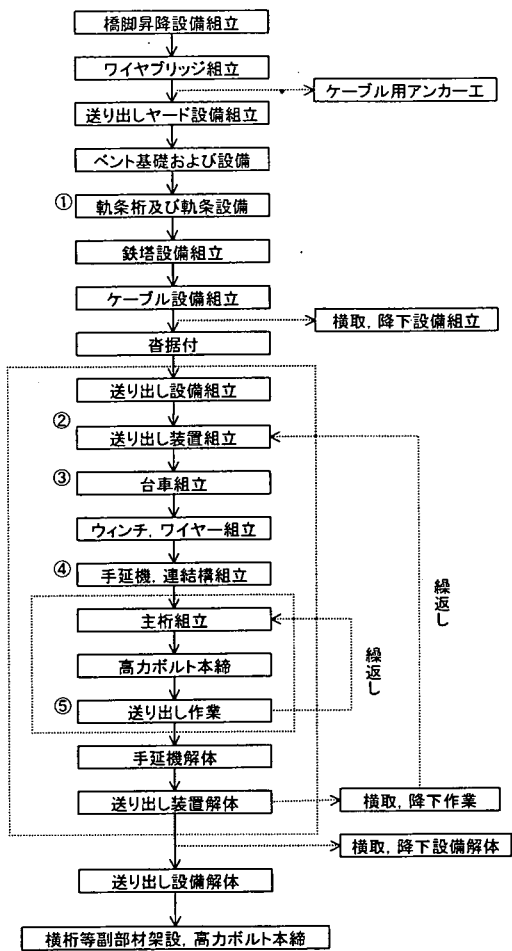


図-12 送出し架設フロー

した事故発生要因の階層構造図である。「送出し桁の平面線形」、「送出し桁の縦断線形」および「ヤードの長さ」の架設条件は、設備ごとに具体的な安全管理上の対処を行ったとしても、潜在的な事故要因として影響が残ると考え、独立した階層構造とした。したがって、安全管理上きびしい架設条件の場合は、よりきびしい危険予知判定結果をアウトプットさせるシステムとした。

#### b) 知識の表現方法と確信度の設定

本安全管理ESにおいても、知識の表現方法はプロダクションルールにより、あいまいさを確信度を用いて表現した。図-13の階層構造の下位を条件部、上位を結論部とするプロダクションルール、例えば、「IF (送出し方向と軌条方向の確認事項において、桁は直線で送出し方向と軌条方向が一致する) ならば、THEN (軌条設備・台車の倒壊が起こる)」というルールが成立するかどうかのあいまいさを確信度を用いて表現した。「軌条設

備・台車の倒壊」の事故要因は14個あるが、軌条設備・台車が倒壊するかどうかの推論は、14個のルールの確信度の集計値をもって行う。集計計算方法は前述した通り、最大値選択法、comb法、平均値法の3つの方法がある。事故が複合要因によって起こることに着目していることから、comb法もしくは平均値法が適していると考えた。本安全管理ESでは、確信度を表-16に示す5段階の基本値を設定し、集計計算方法は平均値法を採用した。これは、comb法の場合、集計数が多くなってくると表-16に示す程度に確信度の基本値を低く抑えても、集計結果が+1に近い値になりやすく、集計値の評価が困難になると考えたためである。また、事故発生要因は、考えられる要因をすべて抽出しているが、重大事故に直接つながらずと考えられるものと、直接的ではないと考えられるものが混在していることから、各要因に表-17に示した3段階の重要度を与えて重み付けを行った。過去の重大事故事例において直接的な要因となったものを重要度1として、重み係数はその影響度が危険度評価に現れるように1.5と設定した。逆にその要因のみでは事故に直接つながらずと考えられる要因については、重要度3とした。重み係数は1より小さい値となるが、危険度を下げる方向であることを考慮し、低下率を小さくし0.75と設定した。

それぞれの確信度は、基本値に重要度 $\alpha$ 値を乗じた値とした。システム構築において確信度は、以上の基準に従い、3人の専門家にアンケート方式で設定してもらい、3種類の確信度を比較検討し決定した。

本安全管理ESは危険度予測を行うのが第一目的であるため、確信度の集計値を危険度として評価する必要がある。危険度は表-18に示す5段階評価とした。確信度の結合回数と集計値の関係を参考にして、現場条件を変化させながら確信度の試算を繰り返し、それぞれの倒壊に対する5段階の危険度評価に対応する確信度範囲を表-19のように設定した。ここで、「送出し装置の倒壊」および「軌条設備・台車の倒壊」に対する要因数は14個と同じであるが、「手延機の倒壊」に対する要因数は2個だけである。そこで、「手延機の倒壊」に対する確信度の集計値を「送出し装置の倒壊」および「軌条設備・台車の倒壊」と同レベルで評価(正規化)する必要がある。そこで本システムでは、「手延機の倒壊」の2つの要因に対する確信度値は前述の基本値の2倍とし、表-19の確信度の評価をすることにより、「送出し装置の倒壊」及び「軌条設備・台車の倒壊」における評価のバラ

表-15 架設工程ごとの事故発生要因とチェック内容

架設工程	事故発生要因	チェック内容 (確信度記号)	分類、(マカ) [重要度]	
	架設条件	平面線形	<ul style="list-style-type: none"> <li>桁は直線である (○)</li> <li>桁は曲線で曲線半径200m程度を大きく超える (△)</li> <li>桁は曲線で曲線半径200m程度 (▲)</li> <li>桁は曲線で曲線半径150m程度 (×)</li> </ul>	架設条件 (a) [2]
		縦断線形	<ul style="list-style-type: none"> <li>送出桁の縦断勾配は上り2%以上 (△)</li> <li>送出桁の縦断勾配は上り2%未満 (○)</li> <li>送出桁の縦断勾配はレベル (○)</li> <li>送出桁の縦断勾配は下り2%未満 (△)</li> <li>送出桁の縦断勾配は下り2%以上 (▲)</li> </ul>	架設条件 (b) [2]
	ヤード長さ (転倒安全率)	<ul style="list-style-type: none"> <li>転倒の安全率は1.2を十分超えている(1.4程度以上) (○)</li> <li>転倒の安全率は1.2ぎりぎりである (▲)</li> </ul>	架設条件 (c) [1]	
①	軌条及び 軌条設備の 設置	ヤードの地耐力	<ul style="list-style-type: none"> <li>台車最大反力により地耐力は確認した (◎)</li> <li>台車最大反力により地耐力は確認していない (×)</li> </ul>	軌条設備 (a) [2]
		ヤードの排水性	<ul style="list-style-type: none"> <li>ヤードの排水性は良好である (◎)</li> <li>ヤードの排水性は悪い (▲)</li> </ul>	軌条設備 (b) [3]
		軌条の起伏	<ul style="list-style-type: none"> <li>軌条に起伏がある (△)</li> <li>軌条に起伏がない (○)</li> </ul>	軌条設備 (c) [3]
		送出方向と 軌条方向	<ul style="list-style-type: none"> <li>桁は直線で桁送出方向が一致する (◎)</li> <li>桁が曲線であるが軌条方向も同方向としている (○)</li> <li>桁が曲線で桁送出方向と軌条方向が一致しないため送出し作業ごとに矯正方向 (残留拘束力の解放) を考慮している (△)</li> <li>桁が曲線で桁送出方向と軌条方向が一致しないため送出作業ごとに矯正方向を考慮しているが完全な残留拘束力の解放の期待ができない (▲)</li> <li>桁が曲線で桁送出方向と軌条方向が一致しないが矯正方向 (残留拘束力の解放) は特に考慮していない (×)</li> </ul>	軌条設備 (d) [1]
		(枕木使用の場合) 枕木の大きさ・耐力	<ul style="list-style-type: none"> <li>枕木の大きさ・耐力を確認した (◎)</li> <li>枕木の大きさ・耐力を確認していない (×)</li> <li>枕木を使用しない (-)</li> </ul>	軌条設備 (e) [2]
		(枕木使用の場合) 枕木の間隔	<ul style="list-style-type: none"> <li>枕木の間隔は計画通りまたは計画時より狭くなっている (◎)</li> <li>枕木の間隔は計画時より広くしている (▲)</li> <li>枕木を使用しない (-)</li> </ul>	軌条設備 (f) [2]
		(鋼製枕木使用の場合) 鋼製枕木下の補強	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼製枕木の軌条下・支持点の腹板に補強材を取り付けている (◎)</li> <li>鋼製枕木の軌条下・支持点の腹板に補強材を取り付けていない (×)</li> <li>鋼製枕木を使用しない (-)</li> </ul>	軌条設備 (g) [2]
		軌条の継目	<ul style="list-style-type: none"> <li>軌条の継目は堅固に固定されている (◎)</li> <li>軌条の継目は堅固に固定されていない (×)</li> </ul>	軌条設備 (h) [2]
		軌条の通り	<ul style="list-style-type: none"> <li>軌条の通りは正確である (◎)</li> <li>軌条の通りはやや悪い (▲)</li> <li>軌条の通りは確認していない (×)</li> </ul>	軌条設備 (i) [2]
		軌条の固定	<ul style="list-style-type: none"> <li>軌条の固定は十分堅固である (◎)</li> <li>軌条の固定は十分堅固とはいえない (×)</li> </ul>	軌条設備 (j) [2]
		軌条の間隔	<ul style="list-style-type: none"> <li>軌条の間隔は精度をよく保たれている (◎)</li> <li>軌条の間隔の精度はあまりよくない (▲)</li> <li>軌条の間隔の精度は確認していない (×)</li> </ul>	軌条設備 (k) [2]
		軌条の走行性	<ul style="list-style-type: none"> <li>軌条敷設後、空台車を通してゲージ、ジョイントの走行性を確認した (◎)</li> <li>軌条敷設後、空台車を通してゲージ、ジョイントの走行性を確認していない (▲)</li> </ul>	軌条設備 (l) [2]
		軌条端部の ストッパー	<ul style="list-style-type: none"> <li>軌条端部にレールストッパー金具を設けた (◎)</li> <li>軌条端部にレールストッパー金具を設けていない (×)</li> </ul>	軌条設備 (n) [1]
		②	送り出し 装置の組み 立て	ジャッキの能力
送出ジャッキの 連動	<ul style="list-style-type: none"> <li>送出ジャッキはすべて連動させる (○)</li> <li>送出ジャッキのすべては連動していない (▲)</li> </ul>			送出し設備 (b) [2]

表-15 架設工程ごとの事故発生要因とチェック内容（つづき）

架設工程	事故発生要因	チェック内容（確信度記号）	分類、(マ-カ) [重要度]
② 送り出し装置の組み立て	送出し装置の受け台のレベル	<ul style="list-style-type: none"> <li>送出し装置の受け台はレベルである (◎)</li> <li>送出し装置の受け台はレベルでない (▲)</li> </ul>	送出し設備 (c) [2]
	ジャッキの滑動	<ul style="list-style-type: none"> <li>ジャッキは十分強固に固定した (◎)</li> <li>ジャッキの固定は十分とは言えない (▲)</li> </ul>	送出し設備 (d) [2]
	送出ジャッキの据え付け方向	<ul style="list-style-type: none"> <li>送出ジャッキの据え付け方向は正確である (◎)</li> <li>送出ジャッキの据え付け方向に誤差がある (▲)</li> <li>送出ジャッキの据え付け方向は確認していない (×)</li> </ul>	送出し設備 (e) [2]
	横移動防止装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>横移動防止装置を設置している (◎)</li> <li>横移動防止装置を設置していない (▲)</li> </ul>	送出し設備 (f) [1]
	送出桁・手延機の継手及び板厚変化に対する処置	<ul style="list-style-type: none"> <li>計画通りのライナー材を使用する (◎)</li> <li>ライナー材を使用するが適正をチェックしていない (▲)</li> <li>特に配慮をしていない (×)</li> </ul>	送出し設備 (g) [2]
	作業足場	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業足場はスペースが十分あり、緊急時の避難スペースもある (◎)</li> <li>作業足場のスペースは十分とは言えない (▲)</li> </ul>	送出し設備 (i) [3]
③ 台車組立	台車ストッパー	<ul style="list-style-type: none"> <li>送出し作業一回ごとにストッパー（歯止め）を使用する (◎)</li> <li>送出し作業一回ごとにストッパー（歯止め）を使用しないがおしめ装置を使用する (△)</li> <li>送出し作業一回ごとにストッパー（歯止め）もおしめ装置も使用しない (×)</li> </ul>	軌条設備 (m) [1]
④ 手延機、連結構組立	部材の変形	<ul style="list-style-type: none"> <li>部材に変形（曲がり、傾き、ねじれ等）がない (◎)</li> <li>部材に小さな変形（曲がり、傾き、ねじれ等）がある (△)</li> <li>部材に大きな変形（曲がり、傾き、ねじれ等）がある (▲)</li> <li>部材に変形（曲がり、傾き、ねじれ等）があるか確認していない (×)</li> </ul>	手延機 (a) [2]
	ボルトの締め付け	<ul style="list-style-type: none"> <li>締付ボルトは正規のものが使用されているか点検した (◎)</li> <li>締付ボルトは正規のものが使用されているか点検していない (×)</li> </ul>	手延機 (b) [1]
⑤ 送出し作業	おしめ装置の使用法	<ul style="list-style-type: none"> <li>桁を後退させるような過張力がかからないよう留意している (○)</li> <li>桁を後退させるような過張力がかからないよう留意をしていない (▲)</li> <li>おしめ装置は使用しない (ー)</li> </ul>	送出し設備 (h) [1]
	送出し量の確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>送出し量をマーキング等により確認している (◎)</li> <li>送出し量をマーキング等により確認していない (×)</li> </ul>	送出し設備 (j) [2]
	作業間の手順連絡	<ul style="list-style-type: none"> <li>各作業間の手順を無線等で連絡、指示するようにしている (◎)</li> <li>各作業間の手順を無線等で連絡、指示するようしていない (×)</li> </ul>	送出し設備 (k) [1]
	反力管理	<ul style="list-style-type: none"> <li>送出し作業ごとにジャッキ反力を測定し計画値とチェックを行う (◎)</li> <li>送出し作業ごとにジャッキ反力のチェックを行わない (×)</li> </ul>	送出し設備 (l) [1]
	送出設備橋脚又はベントの剛性	<ul style="list-style-type: none"> <li>送出装置間の反力移行による偏心曲げに対する橋脚（ベント）の剛性は十分である (◎)</li> <li>送出装置間の反力移行による偏心曲げに対する橋脚（ベント）の剛性は十分とはいえない (×)</li> <li>送出装置間の反力移行による偏心曲げに対する橋脚（ベント）の剛性は十分かどうかわからない (×)</li> </ul>	送出し設備 (m) [2]
	送出し量	<ul style="list-style-type: none"> <li>1日の送り出し量は20m程度以下 (◎)</li> <li>1日の送り出し量は20m程度を超える (△)</li> </ul>	送出し設備 (n) [3]

表-16 5段階評価に対する確信度の基本値

評価	記号	基本値
安全	◎	0.00
普通	○	0.05
不確実	△	0.10
不安	▲	0.15
危険	×	0.20

表-17 チェック項目に対する重要度α値

重要度		α
1	高い ↑ 低い	1.50
2		1.00
3		0.75

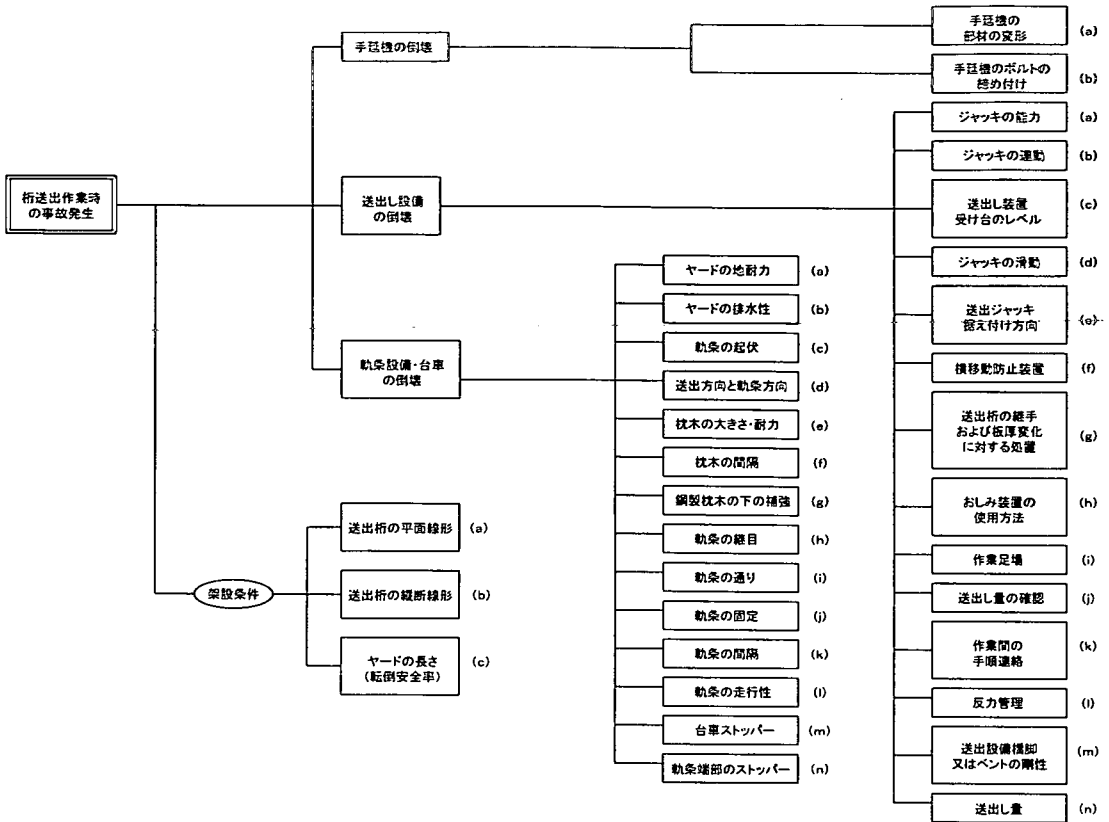


図-13 事故発生要因の階層構造図

表-18 危険度の5段階評価と危険度表示

危険度評価	危険度表示
1	ほぼ安全な施工状態であるといえると思われま
2	ほぼ安全な施工状態であるといえると思われま 次に示す箇所を見直して下さい。
3	やや安全に問題があると思われま。 次に示す箇所を見直して下さい。
4	安全に問題がありま。 次に示す箇所を見直して下さい。
5	かなり不安全な施工状態です。 次に示す箇所を見直して下さい。

表-19 危険度の5段階評価における確信度の範囲

手延機の倒壊		送出し装置の倒壊		軌条設備・台車の倒壊	
確信度範囲	危険度評価	確信度範囲	危険度評価	確信度範囲	危険度評価
0.20 未満	1	0.30 未満	1	0.30 未満	1
0.20 ~ 0.30 未満	2	0.30 ~ 0.35 未満	2	0.30 ~ 0.35 未満	2
0.30 ~ 0.40 未満	3	0.35 ~ 0.45 未満	3	0.35 ~ 0.45 未満	3
0.40 ~ 0.60 未満	4	0.45 ~ 0.55 未満	4	0.45 ~ 0.55 未満	4
0.60 以上	5	0.55 以上	5	0.55 以上	5



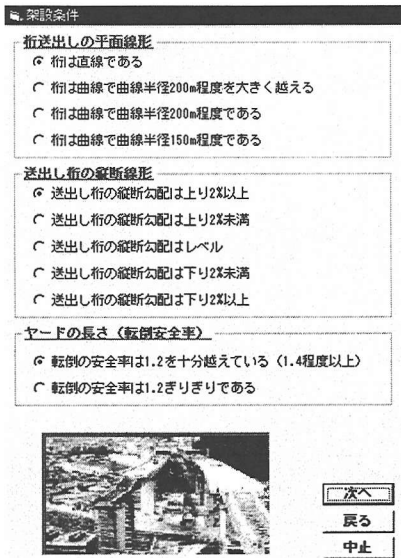


図-14 質問画面例 1

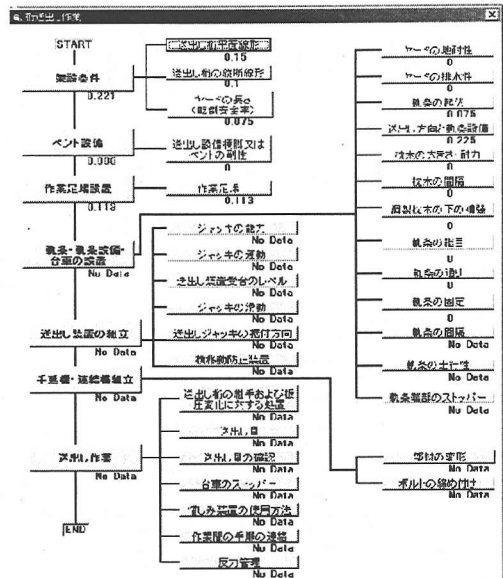


図-15 階層構造図表示画面

事故発生時の結論として以下のような結果が得られました。

「各作業工程」の危険度	作業工程	危険度
架設条件		0.221
ペントの設備		0.000
作業足場設置		0.113
軌条・軌条設備・台車の設置		0.254
送出し装置の組立		0.244
手延機・連結構組立		0.000
送出し作業		0.443
「手延機・連結構組立」までの総合評価		総合危険度
		0.613
総合的な危険度表示		総合評価
安全に問題があります。次に示す箇所を見直して下さい。		4

見直し箇所を確認しますか？  
はい いいえ

図-16 危険度表示画面

特に見直しが必要な箇所は以下の項目です。

事故発生要因	危険度	見直し必要箇所
反力管理	0.3	送出し作業ごとにジャッキ反力を測定し、計
送出し量の確認	0.2	送出し量をマーキング等により確認している
台車スッパ	0.2	送出し作業一回ごとにスッパ(歯止め)の
送出し量	0.075	一回の送出し量は20m程度を越える。

次の行動を決定してください

- 推論を終了する。
- 「タイトル画面」に戻る。
- 「危険度評価画面」に戻る。

決定

図-17 見直し箇所表示画面

ンスをとった。さらに、架設条件を評価した上で、最終的に「桁送出し時の事故発生」の危険度予測を行う。ここでは、「手延機の倒壊」、「送出し装置の倒壊」および「軌条設備・台車の倒壊」の確信度を集計し、さらに架設条件の確信度を結合した確信度集計値を5段階評価する、架設条件は、安全管理上きびしい条件(例えば桁の曲線半径が小さい場合など)の場合、危険度の5段階のランクが1段階上がるシステムとしている。

c) 画面表示による推論過程

システムを起動させると、図-13の階層構造図の事故要因の順に質問が開始される。質問画面例を

図-14に示す。質問画面には、質問内容の理解を補助するため、写真や図を添付している。さらに、階層構造図を常に画面表示し(図-15)、随時入力が終わった項目を着色し、確信度計算値を追加表示していくことにより、利用者がシステムの全体像と推論経過を把握できるように便宜を図っている。

質問画面による全項目の入力が終了すると、確信度の集計計算が行われ、診断結果としての危険度が図-16の例のように画面表示される。ここでの危険度の評価は表-18, 19に示した5段階評価によるものである。

表-20 工法選定 ES における安全管理情報

検討項目	確認事項	選択内容
送出しヤード	送出しヤードと送り出す方向との関係	同一方向か別方向か
	隣接桁の縦断勾配	勾配が5%以上か未満か
主桁形状	主桁平面形状	直線か曲線か、曲線半径が大きい小さいか
	主桁断面形状	等断面か、変断面か
	主桁縦断形状	勾配が5%以上か未満か

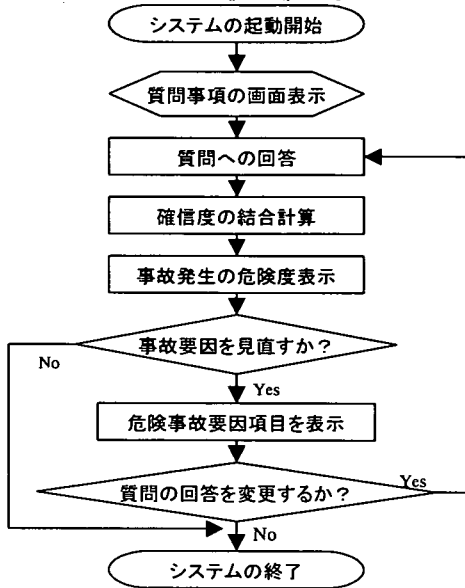


図-18 システムの全体フロー

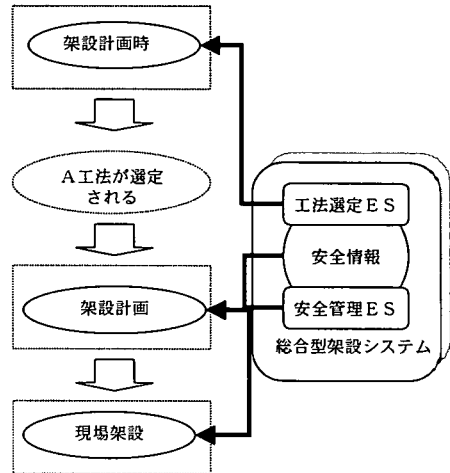


図-19 情報共有型の総合型架設システムの概念図

また、診断の結果、見直しが必要な箇所については、見直し箇所確認を選択することによって、図-17に示すような見直し箇所確認画面が表示される。見直し箇所は、危険度に対する確信度がゼロより大きい項目である確信度がゼロより大きい項目であり、確信度が大きい順に表示している。すなわち、見直し箇所の優先順位を示していることになる。見直しによる再診断を行う場合は、推論結果に対する階層構造を再表示させ、入力変更したい項目を画面上でクリックすることにより、入力変更および再診断ができるようにしている。

以上のシステムのフローをまとめると、図-18のようになる。

## 5. システム統合への発展性

### (1) システム統合の概念

第3章で工法選定ESを、第4章で安全管理ESについて報告した。架設計画から現場架設完了までの架設業務のなかで、工法選定ESは架設計画時に、安全管理ESは現場施工時に利用することを想定しており、それぞれ独立したシステムである。安全管理ESにおける知識は、現場架設時だけでなく、その前段階の業務である架設計画時においても、考慮されるべき重要なものである。さらに、工法選定ESにおいて考慮される条件のなかには、安全管理上重要なものが含まれている。工法選定ESにおいては、安全管理上不利となる架設工法は当然排除される可能性が高い。しかし、他工法との比較において、多少安全性の面で不利な条件でも、

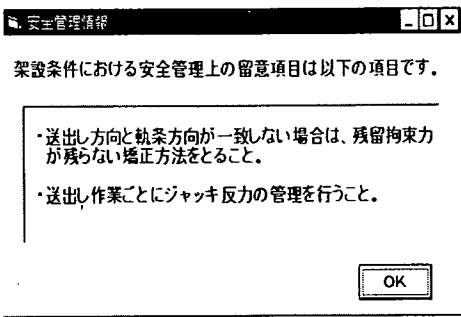


図-20 安全管理情報提供画面

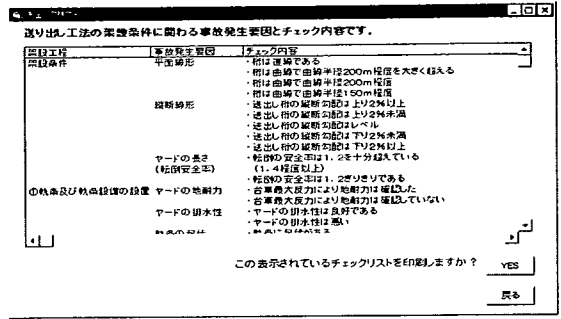


図-21 チェックリスト表示画面

選定されることもある。例えば、曲線桁橋の場合、送出し架設は安全面で不利ではあるが、現実にはよく施工されている。このような場合、架設計画を行うにあたって、安全管理上不利な架設条件に対して、安全管理ESの知識を考慮することは重要である。

そこで、工法選定ESに安全管理ESの知識の一部を共有させ、架設計画に有用な情報を提供する、2つのシステムを統合したシステムを試作した。この総合型システムのプロトタイプは図-19のようになる。

## (2) 総合型システムのプロトタイプ

総合型プロトタイプシステムは、工法選定ESにおいて、手延式送出し工法または架設桁送出し工法が選定された場合のみを対象として構築した。

工法選定ESにおいて手延式送出し工法または架設桁送出し工法が選定された場合、システムの結論画面は3.(2)d)で示した図-10のようになる。ここで、安全管理情報およびチェックリストを要求すると、情報提供画面が表示される。安全管理情報とは、工法選定ESにおいて入力された条件のなかから、安全管理ESで取り扱われる知識から推論される情報である。その知識となる項目は表-20に示したものであるが、これは表-4の検討事項「⑮送出しヤード」の一部および「⑯主桁形状」に該当する。安全管理情報の提供画面は例えば図-20のようになる。また、チェックリストの内容は表-15に示したものであり、画面では図-21のように表示される。

## 6. まとめ

鋼橋架設の工法選定と安全管理業務における実用的な支援エキスパートシステムの構築手法について述べた。また、業務の流れの中の各段階で、独立して使用することを目的として開発したシス

テムを統合するアイデアについて述べた。本研究におけるシステム構築により得られた知見、およびシステムの問題点について、各々のシステムに対して要約し、本論文のまとめとする。

### ・工法選定ESについて

- ① サンプルデータによる検証の結果、比較的信頼性の高い実用システムが構築できた。
- ② 確信度による推論システムでは、結論に至るルール数の違いによって結果の絶対評価が困難となるが、階層化手法によってその問題を解決することができた。
- ③ 推論過程の途中において、対象外の工法を順次排除することにより、推論の効率化が可能となった。
- ④ 架設条件がきびしく、いずれの工法にも選定しえない場合は、「他工法との併用」を出力させたが、他の特殊工法の選定が可能となれば、システムの使用範囲が広がる。

### ・安全管理ESについて

- ① 従来、安全管理にエキスパートシステムを適用した報告はなかったが、事故につながる要因を階層化することにより、危険度を予測し、危険要因の情報提供を行う安全管理ESを構築することができた。
- ② 写真や図を利用して、ビジュアルなシステムが構築できた。ビジュアル化は、本システムのように現場で利用するシステムでは重要な要素と考える。
- ③ 送出し架設工法は、送出し方法、軌条設備の種類などに限ってみても多種多様なものがある。本システムはそれらを代表的なものに限定して構築したが、多種多様なものに細かく対応するためには、サブシステムをきめ細かく構築する必要がある。より汎用性のあるシステムとするには、さらに多くの知識が必要である。本システムは、知識ベースの追加・修正機能を有しており、汎用化への対応を考慮している。

なお、総合型プロトタイプシステムについては、架設業務の流れの中で、別個に構築されたエキスパートシステムを共有する知識に着目して統合するアイデアを示したが、さらに実用的なシステムとするには、工法選定で対象とした工法すべてに対して、安全管理システムを構築し、統合するのが理想的である。

謝辞：本研究に多大な御協力を頂いた（社）土木学会関西支部平成7,8年度共同研究「橋梁架設における安全管理のシステム化に関する研究」、および平成9年度調査研究「橋梁架設の工法選定と安全管理の総合型システムに関する調査研究」のグループメンバー諸氏、並びにシステム構築に協力して頂いた当時山口大学大学院の森山圭吾氏（現株式会社CSK）に深大な謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 岩松幸雄, 早川裕史, 原田隆郎: 橋梁の比較設計支援エキスパートシステムに関する研究, 土木学会論文集, No. 453/VI-17, pp. 51-57, 1992.
- 2) 三上市蔵, 田中成典, 黒田護: 鋼道路橋の詳細設計業務を支援するためのファジィルールベースエキスパートシステムの開発, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 43A, pp. 621-632, 1997.
- 3) 鄭勝仁, 中村秀明, 宮本文穂: 外ケーブルプレストレス補強設計のシステム化に関する研究, 土木学会論文集, No. 623/VI-43, pp. 203-218, 1999.

- 4) 河村圭, 宮本文穂, 中村秀明, 小野正樹: Bridge Management System(BMS)における維持管理対策選定システムの開発, 土木学会論文集, No. 658/VI-48, pp. 121-139, 2000.
- 5) 河村圭, 宮本文穂, 中村秀明, 三宅秀明: 階層構造ニューラルネットを用いたコンクリート橋診断エキスパートシステムの実用化, 土木学会論文集, No. 665/VI-49, pp. 45-64, 2000.
- 6) 橋梁架設の工法選定と安全管理の総合型システム, 土木学会関西支部平成11年度講習会テキスト, 1999.
- 7) 木口健児: 良き事例から安全を学ぼう, 土木施工40巻7号, pp. 10-12, 1999.
- 8) 花安繁郎: わが国の建設労働災害の現状と今後の課題, 土木施工40巻7号, pp. 13-17, 1999.
- 9) 花安繁郎, 渡邊法美: 我が国における建設労働安全管理の考え方と問題点, 土木学会第55回年次学術講演会, VI-297, 2000.
- 10) 橋梁架設工事の積算 平成12年版, 社団法人日本建設機械化協会, pp. 59, 2000.
- 11) 日経コンストラクション, 日経BP社, pp. 101-103, 1997. 10. 10
- 12) 日経コンストラクション編: 建設事故重大災害70例に学ぶ再発防止策, 日経BP社, 2000.
- 13) 特殊架設の手引書, 日本橋梁建設協会, pp. 5-51, 1998.

(2002. 2. 14 受付)

## DEVELOPMENT OF KNOWLEDGE-BASED SELECTION SYSTEM OF ERECTION METHOD AND SAFETY MANAGEMENT FOR CONSTRUCTION WORKS OF STEEL BRIDGES

Hideyuki KONISHI, Ayaho MIYAMOTO and Michiyuki HIROKANE

Bridge construction has become complex and is being conducted on ever large scale, and the technology of bridge construction is advancing rapidly. Currently, problems in the safety management of bridge construction are very important. It is reasonable to suppose that serious accidents can be prevented if potential factors are eliminated. This paper aims to introduce a newly developed expert system which is capable not only to make selection of erection method in steel bridges with a selection process but also to support safety management in the bridge construction for better understanding the accidents during bridge construction for integrating into the expert system.