

知的施工計画支援システム開発における 課題とその考察

Issues in Knowledge-Intensive Planning System for Construction Projects

池田 将明*、大倉 吉雅**、山本 幸司***、古賀 重利****

By Masaaki IKEDA, Yoshimasa OHKURA, Koshi YAMAMOTO and Shigetoshi KOGA

Construction planning is an important task in the management of construction projects. However it has been very difficult to develop the computer systems of this task, because the process of planning and decision-making is very complicated and ill-structured to be systemized with conventional programming technique using FORTRAN or PL/I, programming language. On the other hand, new programming paradigm composed of knowledge representation and reasoning techniques derived from artificial intelligence(AI) has made it possible to systemize the ill-structured problem such as construction planning.

First of all this paper describes the features of construction planning process and the difficulties of its systemization. Then some problems which has been found in the experience of couple of knowledge-based system developments are presented. One of these developments is the expert system for selecting urban tunnel construction methods, and the other is the knowledge intensive scheduling system which have been developed by the authores. In the last part of this paper, some tasks which have to be solved in after this are described.

1. はじめに

建設工事では、設計図書に明示された施工条件だけではなく、明示はされていないが過去の経験から推測されるような、施工遂行上重要となる制約条件が複雑に関係するため、施工計画の立案は非常に難しい問題の1つとなっている。

このため、これまでコンピュータを用いたシステム開発では、例えば工程管理を例にとると、アルゴリズムが明確な日程計算やその結果の作図などはシステム化の対象となっているが、その計画の基となる工程ネットワークの作成に関しては、技術者が多種多様な制約条件を勘案して入力する方法がとられてきた¹⁾。これは、工程計画がどのような段階を踏んで計画化されるのか、また各段

階ではどのような制約条件がどのように働いているのかなど、工程ネットワークを作成する方法が明らかになっていないことに、基本的な理由の1つが存在する。

近年、脚光を浴びるようになった知識工学の分野では、以上のようにアルゴリズム化しにくい問題を悪構造問題(ill-structured problem)と呼び、そのような問題のシステム化を目標として研究が進められている。そして、このような悪構造問題のシステム化方法として、関連する知識をプロダクション・ルールやフレーム・モデルで表し、これに基づいて推論を進める、いわゆる知識ベース・システム技術の適用が効果的であると指摘している²⁾。

すなわち、先ほどの工程管理における工程ネットワークの作成問題のように、これまで施工計画立案過程の中でもシステム化が進んでいない部分は、まさに悪構造問題に属し、それゆえに従来の

* フジタ工業(株)技術研究所土木生産研究室室長
** 同上 主任研究員
*** 名古屋工業大学 社会開発工学科 教授、工博
****フジタ工業(株) 技術研究所 第1研究部 部長

プログラミング方法ではシステム開発が難しく、これまでシステム化の対象と考えられなかったものと考えられる。

しかし、我国経済の発展に伴う工事量の増加や、社会変化による制約条件の複雑化などにより、従来、工事経験の豊富な技術者に依存してきた施工計画問題でさえもコンピュータ・システム化する必要性が、従来にも増して高くなってきている。

本論文では、以上のような基本的な視点に立って、最初に、施工計画問題の特殊性と知識工学手法の適用性について論じ、次に、これまでに行ってきた施工計画問題を対象としたシステム開発の経験に基づき、知識工学手法を用いたシステム開発の問題に関して、選択型問題に属する施工法選択システムと計画型問題に属する工程計画システムの2つの事例を基に分析し、それらの解決策に関して、若干の考察を行った。

2. 施工計画の方法と知識工学の適用

(1) 施工計画立案の方法

建設工事の施工計画作成においては、工事情報の調査収集から、主要工事の施工法や仮設備の検討に基づく概略計画の設定、さらには細部工事までを考慮した詳細計画作成というように、階層的な計画立案方法がとられる³⁾。そして、このような計画内容の詳細化は、一般的には、全体工事をいくつかの部分工事に分割し、その1つ1つにつ

いて仮設工法、施工機械、仮設材料等を具体的に選定し、それ等の手順を決定するという方法で進められる。また、工事全体に係わる共通仮設計画や安全や原価などの施工管理計画が、以上の部分工事の計画化と密接に関係しながら、それ等とは並行的に計画化が進められる。このような施工計画の立案過程を非常に単純化して図化すると図-1の中央の点線内のようなになる。

(2) 施工計画問題の特異性

施工計画の立案手順をシステム構造という観点からみた場合、構造解析システムやCADシステムなどの技術系業務のシステム構造とは随分異なる特徴を有している。

単純な例としてコンクリート擁壁の設計システムを考えた場合、土質条件の設定や擁壁形式の検討など、経験的な知識を必要とする意思決定過程が最初に存在するものの、それ以後の安定計算や断面計算などは、計算のアルゴリズムが明確であり、また計算結果の評価基準や評価方法も、設計仕様書として明示されているため、これ等の設計過程においては不確実な部分は非常に少ない。これは、擁壁の設計方法の標準化や規格化の努力が長期に渡って行われた結果、過去の工事実績から得られた経験的な情報も含めて、設計のための知識が設計仕様書という形に集約されていることによるものと考えられる。

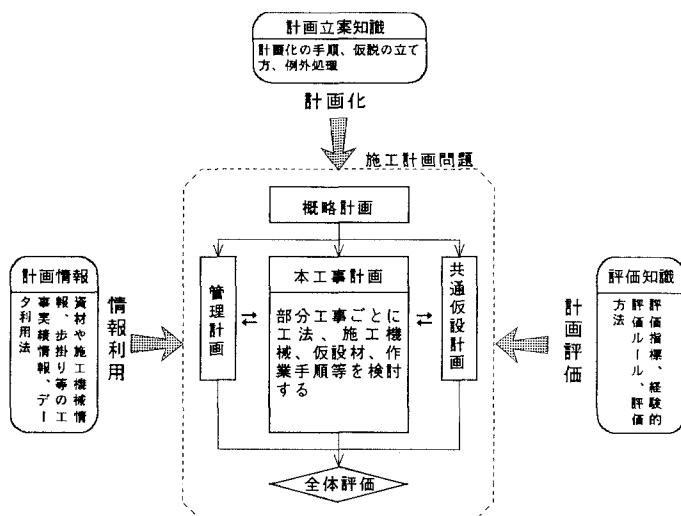


図-1 施工計画問題に関連する知識を表した概念図

これに対して、施工計画業務では、設計図書で明示される工事条件ばかりでなく、周辺環境や気象条件、大規模な工事では工事期間中の経済変動までも考慮しなければならず、先ほどの設計計算業務とは比較にならない程の制約条件が存在する。このため、計画の代替案は無限に近く存在し、それ等の中から最適な計画案を選択するための評価方法も明確とされてはいない状況にある。

(3) 施工計画システム化の問題

このように施工計画は、従来の技術系問題と比較して、特異な問題構造となっているため、これをシステムする場合には技術系システムとは異なる問題が存在する。

例えば、図-1の中では上から下に向かって計画化が進められるが、この計画化の考え方(計画化戦略)は一樣ではなく、全体工事と部分工事との関係や当該工事特有の制約条件などから、複雑な意思決定を伴う分岐を経て進められる。また、計画の精度も、当初のラフな計画から、詳細計画へと階層的に計画化が進められる。このため、これをシステム開発の設計方法として標準的に用いられるフローチャートで表現する事は、その内容が複雑となり現実的ではない。

また、これらの分岐点で行われる意思決定方法は、多分に主観的で定性的な評価方法が用いられるために、数値で簡単に評価しようとする従来システムではうまく対応しない場合が多い。例えば、“周辺に住宅が密集している場合は振動や騒音の高い機械は使用できない”など、施工計画では文字で表現される判断情報が多く存在するが、このような文字情報の操作は、FORTRAN やPL/Iなどの従来からのプログラム言語の得意とするところではない。

また、施工技術は技術開発の歴史は古いものの、不確実性の多く存在する自然を相手にする技術であるため、技術の完成度はそれほど高くはない。このため、他の分野で開発された新材料や新技術の影響を強く受け、施工技術の革新がたびたび行われるという特徴がある。このため、工事計画をシステム化した場合は、技術の進歩と共にこれまでとは異なる属性値を持つ計画情報の追加が必要となり、従来型のシステムでは、頻繁にプログラ

ムの改良を行わなければ、システムが陳腐化してしまうという問題点が存在する。

(4) 知識工学を適用した施工計画のシステム化

以上のように、施工計画問題をシステム化するためには、従来のシステム化技術だけを用いる事には無理がある。これまでも、従来型の技法で開発された施工計画システムはいくつか存在するが、実工事での適用による問題点の発見や、関連技術の発達によるプログラムの更新など、利用者からのシステム改良の要求を満足させて行くためには、今後とも多大の努力を必要とする。

つまり、文字で書かれた定性的な知識の利用や、複雑な分岐を伴う計画過程の表現などの、システム開発時の必要性だけではなく、開発後に必要となるシステムメンテナンスを考えた場合、このような悪構造問題のシステム化には、従来型システム化技術だけでなく、新しいシステム化技術が必要であり、その最も有望な技術として、知識工学技術の適用を推進することが、将来的に重要であると考えた。

以上のような観点から、先ほどの図-1を知識ベース・システムという視点で再検討すると、計画をどのような手順で作成するのかという①計画化のための知識、施工情報をどのように計画に反映させるのかという②情報利用に関する知識、および各段階で作成された計画をいかに評価するのかという③評価方法に関する知識、の3つに分類することができる。そして、このような3つの部分を知識ベース化する方法と、これを利用して施工計画を知識ベース・システム化していくための方法を確立することが大変重要であると考えた。

3. 工法選定エキスパートシステム開発での問題点

ここでは、選択型問題の開発例として、都市トンネル工法選定エキスパート・システム⁴⁾を取り上げ、知識ベース・システム開発の問題点を検討した。

(1) 開発の概要

本システムは、都市トンネルの掘削工法を選定するためのもので、主に技術的コンサルタントや社内教育に利用することを目的として開発した。稼働機械はパソコン(PC-9801)で、開発ツールと

しては『創玄』を用いた。会話形式により質問に答えると、設定条件を満たす可能性のある工法とその概要が、画面上に表示されるようになっていく。選定対象となる工法数は表-1に示すように47工法で、作成した知識ベースは、約500ルールとなった。

工法の選定にあたっては、知識の曖昧性や工法の評価基準として確信度(Certainty Factor)による判定方法を用いたことと、①トンネル工法、②シールド工法、③推進工法、④小口径推進工法、⑤開削工法の5つの中間仮説を設定し、選定工法の絞り込みを行うようにした(図-2)。その他の詳細については、参考文献⁴⁾を参照されたい。

次に、本システムの開発および運用実験で明らかとなった問題点について考察を加える。

表-1 工法一覧表

分類	工法数
シールド	14工法
推進	7工法
小口径推進	9工法
開削	2工法
NATM	15工法

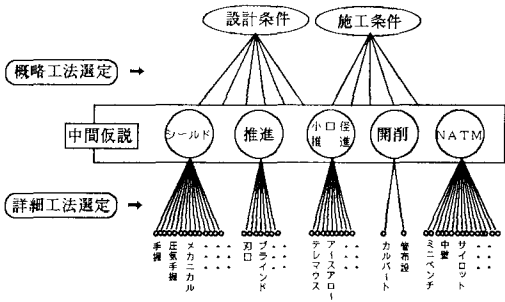


図-2 中間仮説を用いた工法選定の手順

(2) 知識ベースのメンテナンスの問題

知識には常に曖昧さが伴う。例えば、「地質条件が粘性土と砂層の互層の場合に手掘シールド工法が選択される知識」があった場合、この知識の中には、対象物件の地質が粘性土と砂層の互層であるかどうかという①条件の曖昧さと、その場合に手掘シールドが選択されるかどうかという②知識自体の曖昧さの2種類が存在する。

そして、この種の曖昧性を表現する方法としては、確率論に基づくものとファジィ理論に基づく

ものの2種類に分類される⁵⁾が、開発ツールの機能的な制約から、ここでは前者に属する確信度を用い、表-2のような確信度表による選定知識の表現方法を採用した。

しかし、よく知られているように、この確信度の決定においては、理論的裏付けを持つ有効な手段はなく、専門家が経験的な知識に基づいて試行錯誤的に決めざるをえない。このため、本システムの開発においても、予想どおりの結果を出すようになるまでに、確信度の調整には非常に手間をとられたし、また開発後も新工法の組込みのために、確信度を絶えず調整し直さなければならないという問題点が起こった。

表-2 地質条件と工法選定の確信度表(1部)

選定条件					選択工法				
粘性土	砂層	巨礫層	硬岩	中硬岩	手掘	圧気手掘	セパ	圧気セパ	メカニカル
○	○				40	40	40	40	40
○		○			12	12	40	40	12
○			○		-100	-100	24	24	-100
○				○	-100	-100	28	28	-100

(3) ルールの独立性に関する問題

本システムでは確信度の合成方法として、MYCINの方法を用いたが、この方法は「相関の高い条件部を持つルールが複数定義されることは希である」という仮定の上に成り立っている⁶⁾。

しかし、我々の持つ知識の間には、何らかの関連がある場合が普通であり、このような仮定で知識の登録を制限すると、推論に適用される知識の数が極端に少なくなり、推論結果の精度が落ちる結果となる。

例えば、本システムでは、図-2のように5つの中間仮説工法を設定しているが、これ等の中間仮説の中で詳細工法を選定するためのルール数は、中間仮説ごとに異なっている。図-3にシールド工法とNATM工法の場合を示すが、シールド工法では「地質と最大礫径および細粒分含有率」から、また、NATM工法では「地山強度比」というパラメータだけで詳細工法の選定を行っている。このため、概略工法選定においてこの両者の仮説がほぼ同等の確信度で選択された場合、シー

ルド工法に分類される詳細工法が、N A T M工法のものよりも、合成される確信度が高くなる傾向があり、そのための確信度調整をさらに行わなければならないといった問題点が発生した。



図－3 異なる選定要因について

(4) 冗長な質問に関する問題

例えば、図－4 に示すルールのように、土被りが非常に大きい場合は、N A T M工法のみが選択されるが、このような場合であっても、登録されたルールの順序によっては、トンネル径や延長などの無意味な質問を続け、利用者の不信感をつのるという問題点も起こった。

本システムでは、このような問題点が起こらないように、中間仮説を設けて対象工法の絞り込みを行う方法をとったが、それでも、このような問題点が起こるということは、対象問題の構造化（モデル化）をさらに進め、中間仮説をより多く設定する必要があることを示唆しているものと考えられる。

(5) 想定範囲のズレに関する問題

本システムは、その名前が示すように都市部におけるトンネル掘削工法を選定対象としているので、選定のための知識の収集・登録は、“都市トンネル”という前提条件の基に行われた。しかし、そもそも“都市トンネル”とは何か？また都市部とはどんなところを指すのか？という概念は、各

人各様でたとえ専門家といえども完全に一致する性質のものではない。

これまでに、「エキスパート・システムは、開発時に専門家が想定した範囲の問題については良好な性能を示すが、それを少しでも逸脱するとおかしい答えを出す」という問題点が指摘されているが、本システムにおいても同様の問題点がいくつか発見されている。

(6) 利用者と専門家の認識のズレに関する問題

図－5 は推進工法の中の詳細工法を選定するためのルールの例であるが、ここでは「水圧の大きさ」が主要な判定条件となっている。

しかし、ここで“水圧が大きい”とか“小さい”という言葉は、大変主観的な表現であるため、知識の登録者と利用者の水圧に関する感じ方の違いが、選定結果に大きく影響することとなる。本システムの運用時においても、このようなことが主な原因で、選定された結果が利用者の意に沿わなかったケースがしばしば発生した。

4. 知的工程計画支援システム開発での問題点

ここでは、計画型問題の開発例として、知的工程計画支援システム⁷⁾を取り上げ、知識ベース・システム開発の問題点を検討した。

(1) 開発の概要

本システムは、鉄筋コンクリート構造物築造工事の工程計画を支援するためのもので、主に作業所での利用を考えてパソコン(PC-9801)を利用し、開発ツールとしては『KBMS/PC』を用いて開発した。また音声合成ボード“しゃべりん坊”

もし ならば	1)	土被り > 200.0	(+0.20 ≤ 確信度 ≤ +1.00)
	2)	最適工法はシールド工法に分類される。	(確信度 = -1.00)
	3)	最適工法は推進工法に分類される。	(確信度 = -1.00)
	4)	最適工法は開削工法に分類される。	(確信度 = -1.00)
	5)	最適工法は小口径推進工法に分類される。	(確信度 = -1.00)
	6)	最適工法はNATM工法に分類される。	(確信度 = +0.20)

図－4 土被りによりN A T M工法を選定するルールの例

もし かならば	1)	最適工法は推進工法に分類される。	(+0.20 ≤ 確信度 ≤ +1.00)
	2)	水圧は大きい。	(+0.20 ≤ 確信度 ≤ +1.00)
	3)	最適工法はシールド工法に分類される。	(確信度 = -1.00)
	4)	最適工法は掘削工法に分類される。	(確信度 = +0.24)
	5)	最適工法は掘削工法に分類される。	(確信度 = +0.36)
	6)	最適工法は掘削工法に分類される。	(確信度 = -1.00)
	7)	最適工法は掘削工法に分類される。	(確信度 = +0.40)
	8)	最適工法は掘削工法に分類される。	(確信度 = +0.20)
	9)	最適工法は掘削工法に分類される。	(確信度 = +0.20)

図－5 水圧の大きさにより推進工法の詳細工法を選定するルールの例

による音声案内により工事データを入力することにより、工程ネットワークを自動生成し、既存プログラムと連携して、日程計算から工程計画図の作図までを行えるようになってきている。

システムの全体構成は、①音声出力のためにC言語で作成したインターフェイスプログラム、②KBMS/PCとGCLISPで開発した工程ネットワーク自動生成プログラム、および③コンパイラ型N88BASICで開発した既存の工程管理支援システム(PF-NETS)¹⁾の3つの部分からなる。この中で②が知識ベース・システムである。本システムの処理の流れを図-6に示す。システム開発の詳細については、参考文献²⁾を参照されたい。

続いて、本システムの開発に当たって検討した問題点について、主なものを以下に示す。

(2) 知識の体系化に関する問題

施工計画には建設工事の特性から無限に近い代替案が存在し、それ等を評価する要因の数や重要度も工事ごとに多種多様であるため、どれが最適計画であるかの判断や、より合理的な計画を作成する方法も決定しにくい。このため、計画立案の意思決定過程をアルゴリズム化してフローチャートで明示することは不可能に近い。施工計画の立案は計画立案者の経験によって養われた経験的知識を用いたヒューリスティックな方法(発見的方法)が用いられる。この結果、①計画の立案方法は個人によって異なり、また②作成される計画は各人の技量に大きく依存することになる。

以上のような問題は、計画型問題全体についていえることであるが、本システムにおいても図-7の「工程ネットワークの自動生成方法」の決定にあたっては、我々の経験的な知識を基に考案した方法を、事例により検証するという試行錯誤的な方法で行わざるをえなかった。

(3) 知識の蓄積に関する問題

本システムのような計画型問題では、システム内に存在する解を推論するような選択型システムとは異なり、計画に必要な知識の種類や量は無限に近く存在する。例えば、門型橋脚の形式を考えてみても、その種類や形状は図-8のように多種多様であり、これ等の情報の全てを、最初か

らシステム内に組み込む(記憶させる)ことは事実上不可能である。

このため、プログラムの変更を行わず、これ等の情報を段階的にシステム内に蓄積する仕組みは、必要不可欠である。

(4) 入力データ量に関する問題

前項と同様の理由で、本システムでは、入力しなければならないデータの種類や量も、必然的に多くなる。

例えば、図-9には橋脚の工程ネットワーク生成のために入力しなければならない形状寸法の例を示しているが、このように多量なデータを入力しなければならないのは、人間が視覚的に行っている図形の認識が、コンピュータにとっては非常に困難であることにもよる。このため、この図の例では、幅、高さ、厚さ等の主要な形状寸法を入力することにより、他の寸法はそれ等から推測する機能を追加することにより、この問題点を解決している。

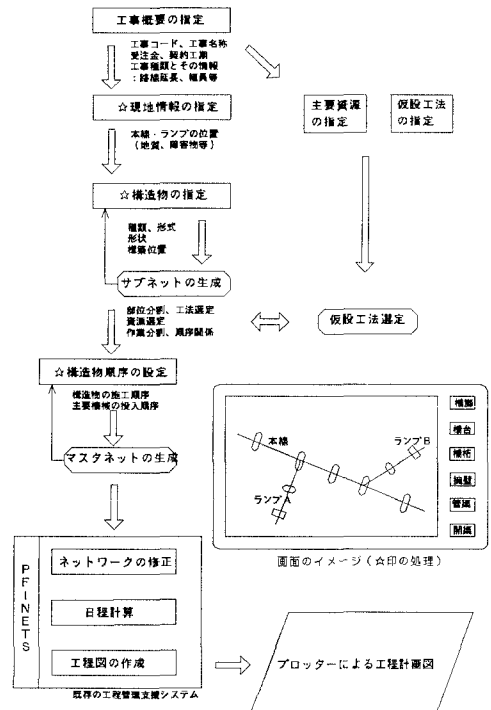


図-6 知的工程計画支援システムの処理フロー

(5) 部分的な選定機能の汎用化に関する問題

計画型問題は、基本的に選定型問題を包含して

いる。例えば、本システムは、工程ネットワークを生成するということから、基本的には計画型知識ベース・システムであるが、その生成過程においては、仮設工法の選定や仮設材料の選定、それに施工重機の選定等の選定型問題を解決しなければならない。

このため、既存の選定型知識ベース・システムを計画型システムに組み込むことが、ソフトウェア資源の有効利用という視点からも重要となる。また、同様に、知識の重複的な登録をなくする観点からも、このような選択型システムを単独にも、また、計画型システムの中からも、同じように利用できることが重要と考え、本システムの開発では、このような利用方法の実現を検討している。

5. 問題点の整理と今後の課題

ここでは、これまでに述べてきた問題点を再検討し、システム開発技術の視点から以下の4項目に再分類して、その対応方法と今後の課題について若干の考察を加える。

(1) 対象問題の構造化による深い知識の利用

工法選定システムで「冗長な質問」や「想定範囲の相違」が指摘されたが、これ等の問題は、対象問題の構造をより深く考察し、表面的な知識ではなく、より深い知識を適用することにより解決できるものと考えられる。

例えば図-10のように、「周辺環境が“住宅が密集している”場合は開削工法は不可能」というルールがあるが、この知識の提供者は“住宅が密集している”からには“道路は狭いだろう”と考え、“開削工法は不可能”という結論を下したのかも知れない。つまり、「住宅は密集しているが、たまたま道路は狭くはなかった」場合にこのルールを適用すると間違った答を出すことになる。

すなわち、専門家が知識をルール化する場合、実際には色々な因果関係などを考慮していても、登録されるルールはそれ等を簡略化した表面的な知識に置き替えられる場合が多い。このことは、より深い知識に基づいてルール化するためには、専門以外の多量の知識も登録しなければならないということが、主要な原因と考えられる。

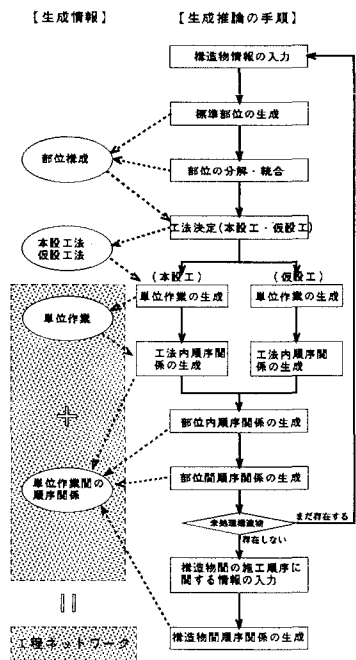


図-7 工程ネットワークの生成手順

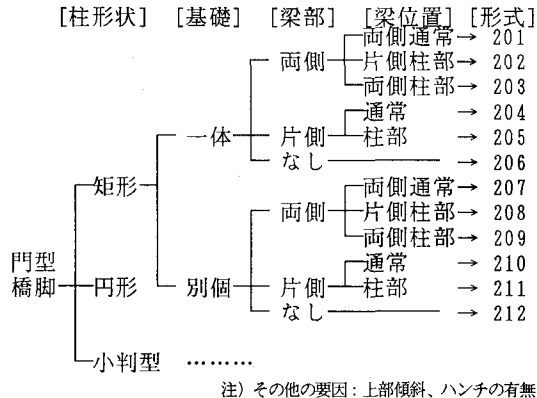


図-8 門型橋脚の形状分類 (一部)

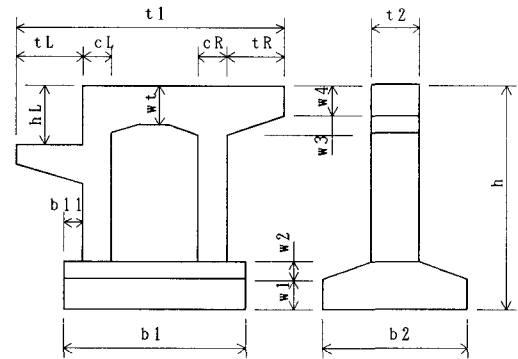


図-9 門型異形橋脚の形状データ

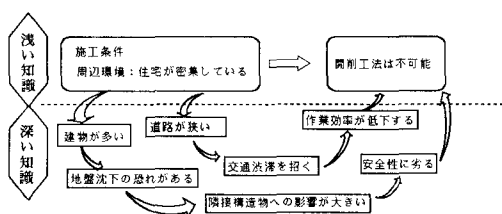


図-10 深い知識と浅い知識の例

(2) 曖昧性の取扱い方法

知識の曖昧性（確からしさ）を表す方法として、確信度がこれまで一般的に用いられているが、この場合、①確信度の決定方法と、同じ結論を示すルール間の②確信度の合成方法をどうするのかは、重要な問題である。これまでは、操作性がよいことと簡便な式で合成できることから、確信度が広く用いられてきたが、知識ベース・システムの開発が、かつてのプロトタイプ段階から実用化段階に移行しつつある現在、このような確信度の考え方では、幅の広い現実問題に対応しにくいことも理解されるようになってきている。

また、最近では、推論で適用するルールの順番に関する曖昧性も重要であるという認識から、ファジィ推論システムという考え方が言われるようになってきているが、先ほどの2つの問題点は、メンバーシップ関数の決定や合成方法という形で、ファジィ理論においてもやはり問題となり、今後の課題と考えられる。

(3) オブジェクト指向プログラミング

先ほどの問題点の洗い出しでは、計画立案処理とそのための知識を分離する必要性が指摘されていたが、このような考え方を実現する概念が、オブジェクト指向であり、知識ベース・システムを開発する上では非常に重要な概念となっている。

現在、このような概念を実現する手段として、フレーム表現やその中で記述されるメソッドやトリガー等の付加手続き、それにルールセットなどが、各種の開発ツールによって提供されているが、これ等の手段を施工計画システムの中で、どの部分をどんな方法で適用するかということを、今後具体的に検討していくことは、大変重要である。

(4) 事例の利用

これまで、たびたび対象問題の構造化の必要性

を述べたてきたが、このようにした場合、推論を進めるために必要となる知識は、現在より格段に多くなり、そのためにより効率的な推論方法が必要不可欠となるものと推測できる。このような場合、専門家はどのように対応しているのかと考え、これまでに経験した類似工事を探し出して、そこから問題解決のための仮説を設定し、それに問題がないかどうかを逆に検証するような方法を用いているのではないかと考えられる。

そこで、施工計画システムにおいても、このような推論方法を導入することが重要であり、そのためのデータ・ベース構築方法と、類似工事の判別方法について、今後は検討を進める必要がある。

6. おわりに

これまで、施工計画問題のシステム化を目的として、知識ベース・システム化の必要性と、開発上の問題点、およびシステム化技術面の課題について考察してきた。なお、今回考察した開発事例は2つともパソコンを用いたもので、ハードウェアの性能に関する制約は勿論存在したが、本論文ではソフトウェアに関する問題だけを論じた。今後は、これらの結果を踏まえて、さらに施工計画のシステム化を推進して行きたいと考えている。

最後になるが、施工計画問題のシステム化に関して、これまでご指導戴いた吉川和広先生（京都大学教授）と春名 攻先生（立命館大学教授）に謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 池田将明、吉川和広、春名攻：パーソナル・コンピュータを用いた工程管理システムの開発に関する方法論的研究、土木学会論文集No. 391 / VI-8、1988. 03
- 2) 池田将明：知識工学手法を適用した工程計画立案方法に関する研究、土木計画学研究・論文集No. 7、1989. 11
- 3) 春名 攻、田坂隆一郎：工事の多階層構造特性を考慮した工程計画・管理のシステム化、第3回土木計画学研究発表会
- 4) 大倉吉雅、和久昭正、鎌田正孝：都市トンネル工法選定システムの開発、土木学会第43回年次学術講演会、1988. 10
- 5) 長尾 真：知識と推論、岩波書店、1988. 7
- 6) 上野晴木、小山照夫：エキスパート・システム、オーム社、1988. 12
- 7) 池田将明、大倉吉雅、古賀重利：知的工程計画支援システムの開発に関する研究、第15回土木情報システムシンポジウム、1990. 10