

論文・報告

橋梁形式選定エキスパートシステム の実用化に関する研究

Study on Expert System of Bridge Type Selection for Practical Use

野村 国勝*
Kunikatsu NOMURA

前田 研一**
Ken-ichi MAEDA

西土 隆幸***
Takayuki NISHIDO

島田 清明****
Kiyooki SHIMADA

キーワード

エキスパートシステム
ファジィ理論
オンラインシステム
橋梁形式選定

1. まえがき

一般に、予備設計段階における橋梁上下部工の形式選定作業は、設計者の熟練度により、作業時間、選定結果および算定工費が大きく異なる。この作業では、教科書的な知識だけでなく、設計者の経験によって得られた知識が非常に重要となる。しかも、後者の知識は短期間に得られるものではなく、これまでは各設計者が地道な努力によって獲得するしか方法がなかった。もし、熟練設計者の総合的な知識を、他の設計者が平等に活用することができれば、大幅な作業の省力化が可能となる。

そのような問題を解決するために、最近では、多くの分野でエキスパートシステムが積極的に開発されている。土木分野でも、1984年にエキスパートシステムに関する論文¹⁾が初めて発表されて以来、さまざまなエキスパートシステムが開発されており、実用化されているものも多くある²⁾。

以上のような背景から、著書らは、橋梁上下部工の形式選定のためのエキスパートシステムを開発した^{3),4)}。システムの開発に当たっては、選定作業の一部のみを深く掘り下げることはせず、選定作業全体を対象としたトータルなシステムとすることを考え、実際の使用を通してシステムの充実を図ることとした。また、開発環境としては、ワークステーション(KS-303, 日本ユニシス社製)およびエキスパートシェル(KEE, インテリコップ社製, LISP言語使用)を使用した。

橋梁の架設地点には山間、都市、河川などがあるが、これらの地点すべてに適用できるシステムを一度に開発することは、多大な時間が必要となり、困難である。そこで、まず河川橋梁に限定して河川構造令を反映できる

システムを開発し、順次、他の架設地点に適用できるようにシステムを拡張することにした。河川構造令には種々の制約条件があり、経験の少ない設計者にとって、これらを満足する径間割を作成することは非常に困難である。そこで、本システムでは、河川構造令を完全に満足する径間割を自動的に作成できるようにした。

また、最適な杭形式を選定するには土質や施工条件を考慮しなければならないが、これらの条件にはあいまいな要素が多く、困難が伴う。本システムでは、これらのあいまいな要素を取り扱う方法としてファジィ理論を用いた。さらに、杭工費の算定精度を高めるためにワークステーションとホストコンピュータとをオンラインし、ホストコンピュータで橋台、橋脚の安定計算を行った結果から杭工費を算定することにした。

本文は、著書らが開発したエキスパートシステムの特徴と、本システムの構築に際して得られた知見とについて述べるものである。

2. 本システムの概要

本システムのフローを図-1に示す。

本システムは、上部工と下部工とに処理が分かれている。まず、上部工に関するデータを入力し、上部工の処理が行われる。それらの結果と下部工に関するデータを入力し、下部工の処理と全体評価が行われる。

本システムの使用者としては、橋梁設計に関して基本的な知識を持つ人を考えている。その理由は、全くの素人だと入力データの内容が理解できないばかりか、最終的な形式決定も不可能となるからである。

エキスパートシステムの開発では、一般に、ある分野の専門家の持つ知識をナレッジエンジニアがインタビュー

*川田工業㈱技術本部本部長代理 **川田工業㈱技術本部中央研究室室長 ***川田工業㈱技術本部中央研究室 ****川田工業㈱技術本部技術部設計二課

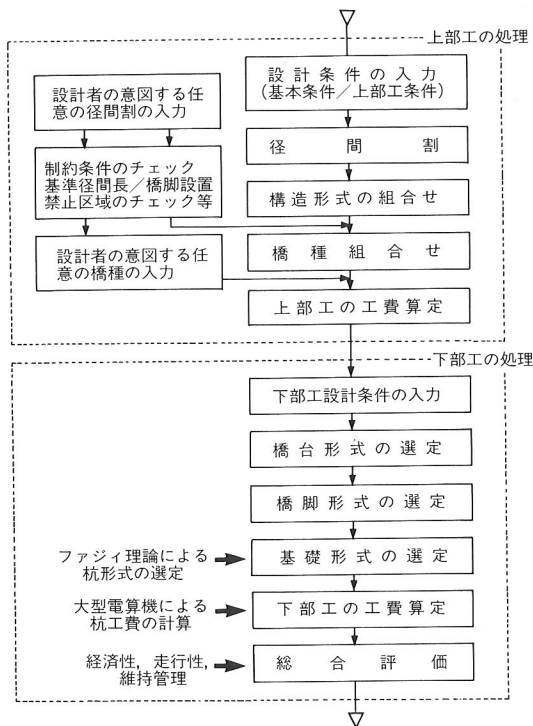


図-1 システムのフロー

一してルールを作成する方法が取られている⁵⁾。この場合、ナレッジエンジニアが十分満足いくインタビューを行うには、その分野の知識をある程度理解しなければならず、長時間を要することになる。そこで今回は、ナレッジエンジニア(1名)、熟練設計者(上下部工各1名)のほかに、橋梁設計とコンピュータとの両方の知識を持つ技術者1名を加え、計4名で作業を進めた。まず、技術者が熟練設計者にインタビューし、その内容を再度4名で議論しまとめ、それに基づき技術者とナレッジエンジニアとが知識ベースやプログラムを構築していった。

3. 上部工の形式選定と工費算定

(1) 径間割

上部工に関する入力データを使い、河川構造令⁶⁾に基づいて基準径間長(最低径間長)が計算され、橋脚設置禁止区域が画面に表示される。本システムでは、この二つの条件を満足するような径間割が行われる。

まず最初に、基準径間長以上となる N 、 $N-1$ 、 $N-2$ の3通りの等径間割が作成される(N は等径間割の最大径間数)。例えば、橋長が200m、基準径間長が30mの場合には、 $N=6$ (径間長=33.333m)、 $N-1=5$ (径間長=40m)、 $N-2=4$ (径間長=50m)となる。ここで、 $N-3$ 、 $N-4$ 、 $\dots$ も基準径間長以上となるが、経済性などから考慮しない。

次に、等径間割の結果、橋脚が設置禁止区域に入る場合には、熟練設計者の知識と5m緩和規定、高水敷の特例などの河川構造令の規則とを用いて、それらの橋脚が設

置禁止区域から出される⁷⁾。図-2に橋脚が設置禁止区域から出される一例を示す。

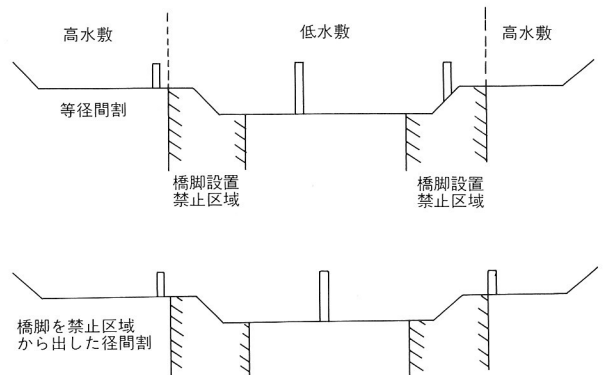


図-2 橋脚を禁止区域から出す方法の一例

なお、本システムでは、ルールを「IF~THEN」の形で表現し知識ベース上に構築したものと、プログラム(LISP言語)で表現したものがある。それは、複雑なルールを「IF~THEN」の形で表現することが逆に複雑な作業となるからである。径間割の大部分の処理は、プログラムで行われている。

本システムで採用した熟練設計者の知識は、もちろん完全なものではない。完全な知識ベースやプログラムを構築するためには、本システムを実際に使用しながら、長い年月をかけてそれらを充実させる必要がある。

そこで、より実用的なシステムとするために、本システムで得られた径間割はすべて画面表示され、システムを使用する設計者が不必要なものを削除できるようにした。また、径間割が事前にわかっている場合には、その径間割を入力すれば、それ以後の作業から行えるようにした。

(2) 橋種の選定

図-3に本システムで取り扱える橋種を示す。

選定された径間割に対して、構造形式(単純、連続梁)を作成した後、数種のマニュアル^{8)~10)}を用いて橋種の組合せが行われる。その方法だけでは組合せ数が多くなることから、例えば、以下のような熟練設計者の知識に基づいたルールを用いて橋種の絞り込みが行われる。

- ① 箱桁の径間長 $\geq$ I桁の径間長とする。
- ② 桁橋以外(トラス、アーチなど)の橋種は混合させない。
- ③ 斜角 $\leq 70^\circ$ のときは鋼単純非合成箱桁、鋼単純非合成I桁は使用しない。

径間割と同様に、橋種はすべて画面表示され、本システムを使用する設計者が不必要なものを削除できる。また、橋種が事前にわかっている場合には、その橋種を入力できるようにした。

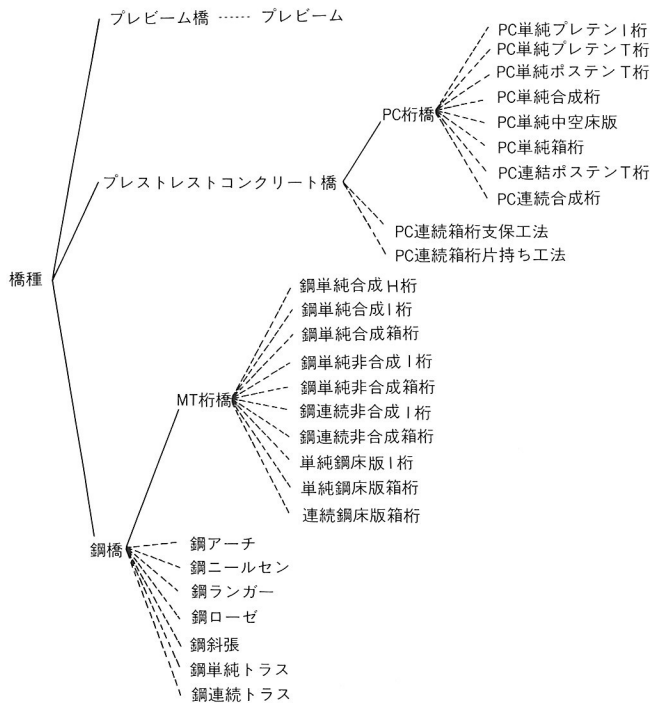


図-3 本システムで採用した橋種

(3) 工費の算定

選定されたすべての橋種の組合せに対して、鋼橋計画マニュアル⁸⁾とPC道路橋概算工事費のマニュアル¹¹⁾とを用いて上部工工費が算定される。なお、参考までに鋼橋では、1回分の塗り替え工費が算定される。

4. 下部工の形式選定と工費算定

(1) 橋台、橋脚の形式選定

下部工に関する入力データから、鋼橋計画マニュアルを参考にして作成した表-1を使って、橋台、橋脚の形式が選定される。

表-1 橋台、橋脚形式と経済的高さ

橋台形式	経済的高さ(h)
重力式橋台	$h \leq 4 \text{ m}$
逆T式橋台	$4 \text{ m} < h \leq 12 \text{ m}$
控え式橋台	$12 \text{ m} < h$
橋脚形式	経済的高さ(h)
壁式橋脚	$h \leq 8 \text{ m}$
逆T式橋脚	$8 \text{ m} < h \leq 15 \text{ m}$
柱式橋脚	$15 \text{ m} < h$

(2) 基礎形式の選定

下部工の入力データと本システムの設計条件から、直接基礎か杭基礎かの選定が行われる。杭基礎が選定された場合には、ファジィ理論を用いて杭形式が選定される。

(3) ファジィ理論を用いた杭形式の選定

杭形式は、一般には、「道路橋方書下部工編」の基礎形式選定図表¹²⁾を参考にして、熟練設計者によって選定されている。基礎形式選定図表の施工深度を例に取れば、 d を施工深度とすると打ち込みRC杭に対する選定要素は、

$2 \leq d \leq 5 \text{ m}$: 施工実績がある

$5 \leq d \leq 15 \text{ m}$: 施工実績が多い

$15 \leq d \leq 25 \text{ m}$: 施工実績がある

$25 \leq d \leq 40 \text{ m}$: 施工実績がほとんどない

$40 \leq d \leq 50 \text{ m}$: 施工実績がほとんどない

$50 \leq d \leq 60 \text{ m}$: 施工実績がほとんどない

となっている。土質試験の結果、施工深度が25 mとなる場合には、この選定図表では「施工実績がある」「施工実績がほとんどない」のどちらでも選べる。また、土質試験の結果も架設地点の平均的な値であり、あいまいさを含んでいる。すなわち、この選定図表のみを用いると熟練設計者の選定結果と異なることも考えられる。このような選定上の矛盾を解決するために、著者らはファジィ理論¹³⁾を用いることにした。

なお、本システムでは、基礎形式選定図表を用いた杭形式の選定も可能である。

a) 選定要素のファジィ表現

ここでは、施工深度などの選定要素のあいまいさをファジィ集合で表現する方法を述べる。

施工深度を例に取れば、選定要素は、

特に小さい ($2 \leq d \leq 5 \text{ m}$)

小さい ($5 \leq d \leq 15 \text{ m}$)

やや小さい ($15 \leq d \leq 25 \text{ m}$)

普通 ($25 \leq d \leq 40 \text{ m}$)

大きい ($40 \leq d \leq 50 \text{ m}$)

特に大きい ($50 \leq d \leq 60 \text{ m}$)

に分類される。施工深度が「大きい ($40 \leq d \leq 50 \text{ m}$)」をファジィ集合で表現すると、図-4の右側ようになる(この図も含め本文で示されるファジィ集合はすべて熟練設計者の知識に基づき作成されたもので、本システムで実際に用いた値である)。この図は、適用度が1に近づくほど確からしさが高くなることを意味している。

b) 選定要素と杭とのファジィ関係

各杭の選定可能性は、a)の方法で得られた各選定要素に対して求めればよい。しかし、施工深度が「大きい」というファジィ集合は幅を持っていることから、各杭の選定可能性を直接、求めることは困難である。

そこで、施工深度に対する各杭の選定可能性を同様にファジィ集合で表現し、図-4の方法で特定の選定要素に対する各杭(この図では打ち込みPC杭)の選定可能性を求めることにする。図-4の結果より、打ち込みPC杭の選

定可能性は0.4となる。同様の方法で特定の選定要素に対する各杭の選定可能性を求めると、図-5のようになる。

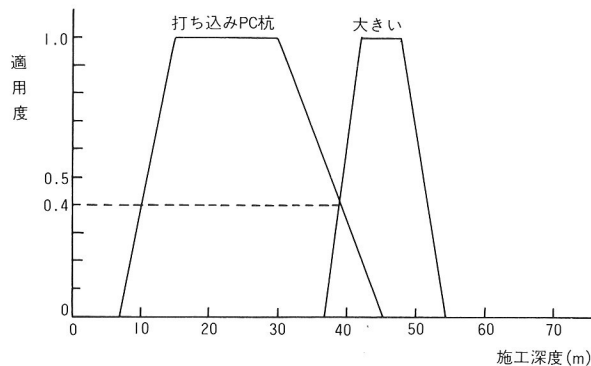


図-4 施工深度が「大きい」場合に対する打ち込みPC杭の選定可能性

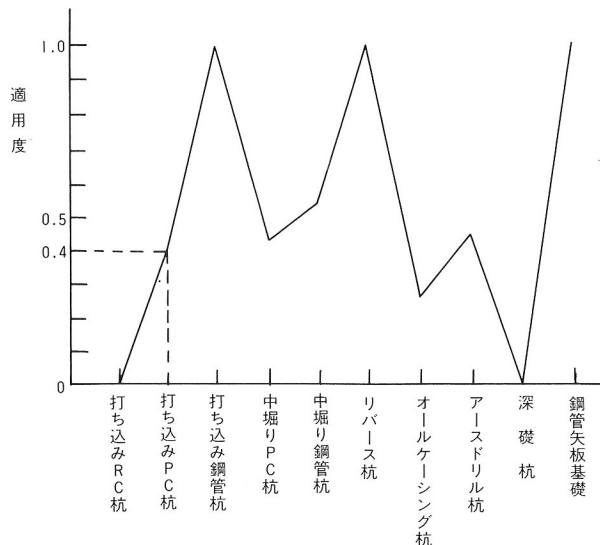


図-5 施工深度が「大きい」場合の各杭の選定可能性

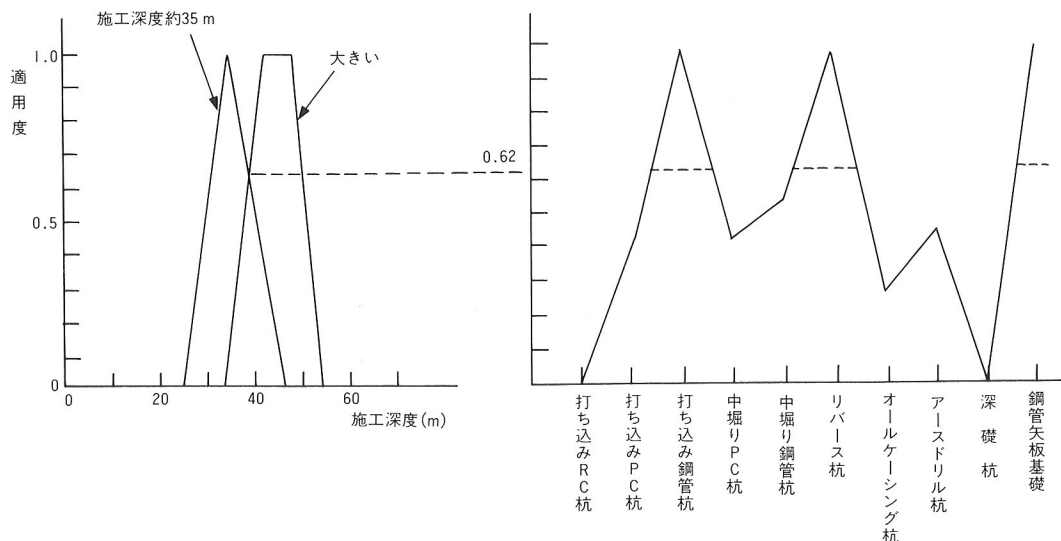


図-6 施工深度が「大きい」場合の「約35 m」のときの各杭の選定可能性

c) ファジィ推論

特定の選定要素(施工深度が「特に小さい」「小さい」…)に対する各杭の選定可能性は、上述の方法によって求められるが、ここでは施工深度が「約35 m」というような、任意の選定要素に対する各杭の選定可能性を求める方法について述べる。すなわち、以下のようなあいまいな状態を考えることにする。

規則：A⇒B 施工深度が「大きい」に対する各杭の選定可能性

事実：A' 施工深度が「約35 m」

結論：B' 各杭の選定可能性は？

図-6は、その方法を示しており、各杭とも適用度は0.62以下となる。

施工深度の選定要素は、「大きい」の他に、「特に小さい」「小さい」「普通」そして「特に大きい」があり、これらについても、図-6と同様の方法で各杭の選定可能性を求める。それらの選定要素に対して、最大の適用度となるものが各杭の選定可能性になる。

選定条件は、施工深度のほかに、れきの状態、中間層の硬さ(N値)、施工水深などがある。これらの選定条件についても、各選定要素に対して同様の方法で各杭の選定可能性を求める。

すべての選定条件を考慮した最終的な各杭の選定可能性は、選定条件ごとの各杭の最大の適用度に重みづけをし、全選定条件に対して平均値を取れば得られる。その中で最大の平均値となる杭形式が最適なものとなる。

本システムの個々のファジィ集合は、熟練設計者の知識を十分反映したもので妥当なものと考えられたが、それらを使った推論結果と熟練設計者の選定結果とが異なる場合もあった。その原因として、熟練設計者の知識は

常に整理されたものではなく、全体を通して考えると矛盾が生じることもあるからである。そこで、本システムで用いたファジィ集合は、熟練設計者の選定結果と一致するように何度か修正を行っている。

(4) 工費の算定

橋台、橋脚および基礎形式(直接、杭基礎)の工費は、鋼橋計画マニュアルを用いれば簡単に算出できる。しかし、杭工費を鋼橋計画マニュアルで算出する場合には、杭本数や杭の種類が考慮できず、誤差が大きくなることが考えられる。

そこで、本システムでは、ワークステーションとホストコンピュータとをオンラインし、ホストコンピュータで橋台、橋脚の安定計算を行い(FORTRAN言語)、その結果から杭工費を算定することにした。

すなわちファジィ理論あるいは基礎形式選定図表を使って得られた上位3種類の杭形式を対象にして、表-2に示すように杭径を変化させる。例えば、打ち込みPC杭、打ち込み鋼管杭、リバース杭の3種類を対象にすれば全部で7通りの組合せとなる。そして、それらのすべての組合せに対して、ワークステーションで橋台、橋脚の安定計算に必要なデータが自動的に作成され、RS-232Cを介してホストコンピュータに転送される。ホストコンピュータで計算後(一つの橋脚に対する計算時間は約3

分)、杭本数、橋台、橋脚のフーチングの寸法のみがワークステーションに転送される。

ワークステーションですべての組合せに対する工費を算定し、最も安価となる杭形式と杭径との組合せが最適なものとなる。また、橋台、橋脚のフーチングの寸法も得られることから、正確な掘削工費と締め切り工費が算定できる。

なお、下部工費は、橋台、橋脚ごとに本体、杭、掘削、締め切りのそれぞれの工費が算定できる。

(5) 全体評価

全体工費は、上部工費と下部工費とを合計することにより得られる。その結果、全体工費が最も安価となる上下部工の組合せが「経済性1位」と評価される。

本システムでは、参考資料として走行性、保守性についても以下のように評価される。

- ① 走行性：ジョイントの数により、「優位」「中位」「劣る」と表示される。
- ② 保守性：鋼橋に対して「塗装の塗り替えが必要」、PC橋に対して「防食法に留意すること」と表示される。

5. 適用例と考察

本システムを既往の比較設計案に適用した結果を図-7, 8に示す。比較設計案では10案が、また、本システムではPC橋12案、鋼橋18案の計30案が得られた。以下に図-7, 8についての考察を加えることにする。

(1) 径間割と橋種の選定

図-7に示すように、径間割に関して、比較設計案(10案)と完全に同じ結果となるものは、本システム(30案)では得られなかった。これは以下の理由からである。比較設計案では、熟練設計者は、橋脚が設置禁止区域に入らないように美観などを考慮して径間割を決定している。

表-2 ホストコンピュータで計算する場合の杭径

杭形式	径(mm)
打ち込みRC杭 打ち込みPC杭 打ち込み鋼管杭 中堀りPC杭 中堀り鋼管杭	600, 800
リバース杭 オールケーシング杭 アースドリル杭 深礎杭	1000 1200 1500

基本データ	
橋長(m)	: 307.4
川幅(m)	: 300
斜角(度)	: 80
全幅員(m)	: 10.75
計画高水位(m)	: 2
治水上の支障	: ない
高水位流量(m ³ /s)	: 4350
高潮区間	: いいえ
背水区間	: いいえ

上部工データ	
有効幅員(m)	: 9.75
基準径間長(m)	: 42.394
桁高制限	: 考慮しない
鋼合成桁	: 使用しない
最大径間数	: 7

下部工データ	
水平震度	: 0.2
中間層の地盤	: N値約30
高水敷左Q値	: 10
低水敷Q値	: 10
高水敷右Q値	: 10
れき径	: 5から10cm
鉛直荷重(径間長)	: 約60m
施工深度	: 約15m
施工水深	: 約4m

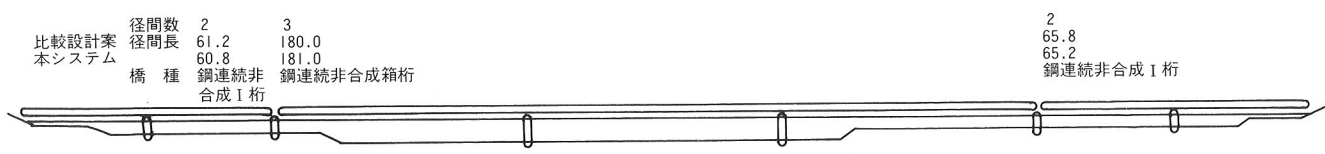


図-7 比較設計案と本システムの選定結果

それに対して、本システムでは等径間割の結果、橋脚が設置禁止区域に入る場合には、図-2に示すように、橋脚を設置禁止区域の内側、あるいは外側の境界線上に設置するようにしているためである。

本システムで熟練設計者の径間割に関する美的感覚をルールとして表現するのは非常に難しく、実際に本システムを使用しながらルールを構築する方法が最も有効と思われる。しかし、本システムでは、現時点でも設計者の希望する径間割を入力できることから、このような問題に対しても十分対応できる。

また、橋種に関しては、比較設計案と完全に同じものが得られた。

(2) ファジィ理論による杭形式の選定

本システムでは、図-7の下部工条件の持つあいまいさに対しても、ファジィ理論を用いて容易に杭形式の選定を行うことができた。本システムで用いた図-7の下部工条件に対するメンバーシップ関数(ファジィ集合)を、図-9~13に示す。また、ファジィ理論による杭形式の選定結果を表-3に示す。

ファジィ理論によって選定された上位3種類の杭形式に対して、ホストコンピュータを用いた計算結果から、径が1200mmのリバース杭が選定された。この結果は、比較設計案の選定結果と一致し、ファジィ理論による杭形

式選定が妥当であることがわかった。

(3) 工費の算定

本システム(杭工費の算定をホストコンピュータで行った場合)と比較設計案との比較を表-4に示す。また、P3橋脚と下部工の工費について、杭工費の算定をホストコンピュータで行った場合と鋼橋計画マニュアルの図を用いて行った場合の比較を表-5に示す。

これらの結果から、上部工工費は鋼橋計画マニュアルの図を、また、下部工工費はホストコンピュータを用いれば、比較設計案と非常に近い工費が得られることがわかる。一方、杭工費を鋼橋計画マニュアルの図から求めると比較設計案との差が大きくなるが、工費が簡単に得られることから、比較設計業務の性格次第では、この方法も十分活用できると思われる。

(4) 選定および算定時間

比較設計案を本システムに適用すると、杭工費を鋼橋計画マニュアルで算定する場合の全作業時間は約2時間、一方、ホストコンピュータで算定する場合は約8時間となった。

両者の方法はそれぞれ長所を有しており、比較設計業務の性格に応じ有効な利用が考えられる。また、杭工費をホストコンピュータで算定する場合には、ホストコンピュータの計算中に他の作業も平行して行えることか

径間数	2	3	2					
径間長	60.8	181	65.2					
橋 種	鋼連続非合成I桁	鋼連続非合成箱桁	鋼連続非合成I桁					
橋台橋脚	橋台A1	橋脚P1	橋脚P2	橋脚P3	橋脚P4	橋脚P5	橋脚P6	橋台A2
橋 台	橋台左(A1)	: 形式=控え式橋台	高さ(m)=15.7	基礎形式=リバース杭1200		杭長(m)=3.5		
	橋台右(A2)	: 形式=控え式橋台	高さ(m)=15.8	基礎形式=リバース杭1200		杭長(m)=3.5		
橋 脚		・ 形 式	高さ(m)	基礎形式		杭長(m)		
	P1	逆T式橋脚	8.2	リバース杭1200		9.0		
	P2	逆T式橋脚	9.2	リバース杭1200		8.0		
	P3	逆T式橋脚	13.0	リバース杭1200		4.5		
	P4	逆T式橋脚	13.0	リバース杭1200		4.5		
	P5	逆T式橋脚	8.2	リバース杭1200		9.0		
	P6	逆T式橋脚	8.2	リバース杭1200		9.0		
総合評価	: 経済性 第2位 : 保守性 塗装の塗替えが必要 : 走行性 優れている							
工 費	上部工/下部工工費合計(万円) 89856 (上部工小計: 62853 下部工小計: 27003)							
【工費内訳(単位: 万円)】								
上部工	:	製作費	輸送架設費	橋面工費	現場塗装費	[小 計]	(塗替工費 3107)	
左高水敷		5393	1244	2182	301	9120		
低水敷		32736	4122	6142	773	43773		
右高水敷		5983	1340	2301	336	9960		
下部工	:	本体工費	掘削/仮設費	杭基礎工費		[小 計]		
橋台左(A1)		1912	2929	1330		6171		
橋台右(A2)		1937	2941	1345		6223		
橋脚(P1)		1406	253	260		1919		
橋脚(P2)		973	391	181		1545		
橋脚(P3)		1598	537	181		2316		
橋脚(P4)		4513	537	485		5535		
橋脚(P5)		891	253	181		1325		
橋脚(P6)		1443	253	273		1969		

図-8 適用例の出力結果

図-8 適用例の出力結果

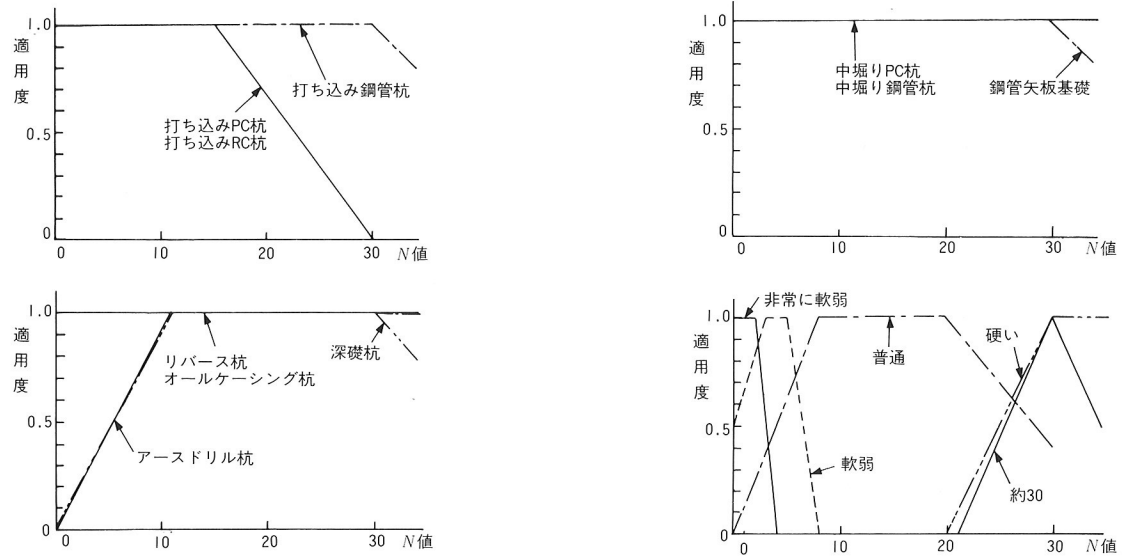


図-9 中間層のN値に対するメンバーシップ関数

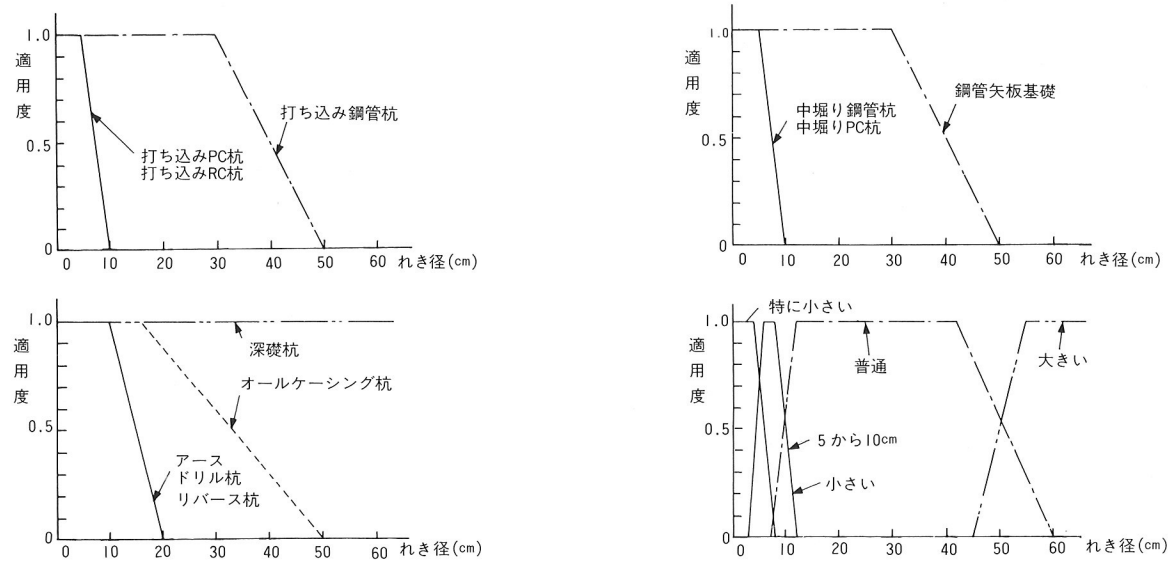


図-10 れき径に対するメンバーシップ関数

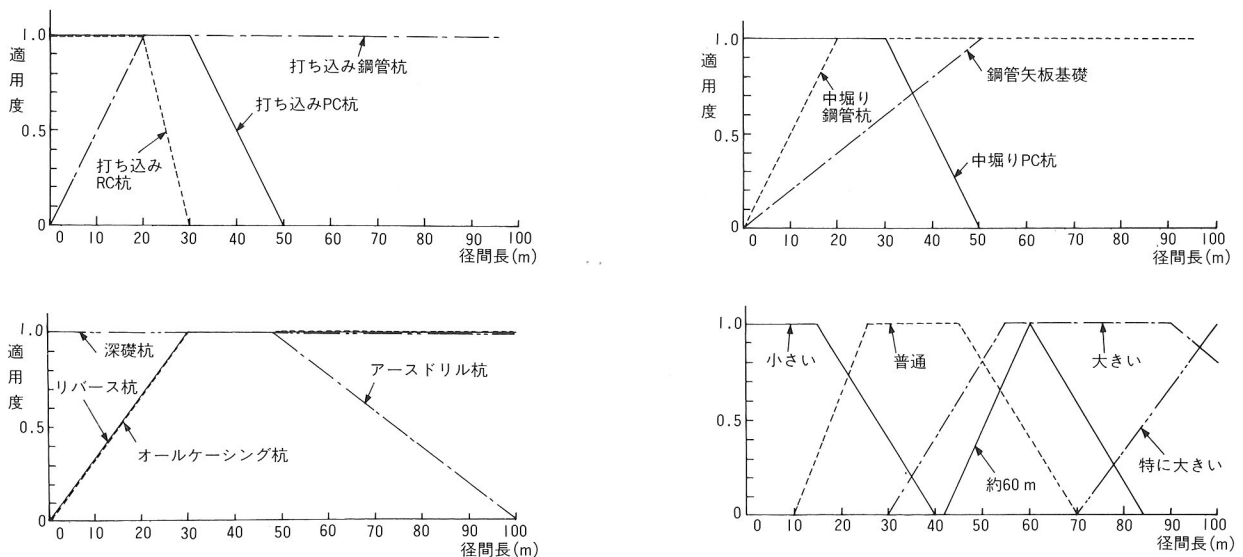


図-11 鉛直荷重(径間長)に対するメンバーシップ関数

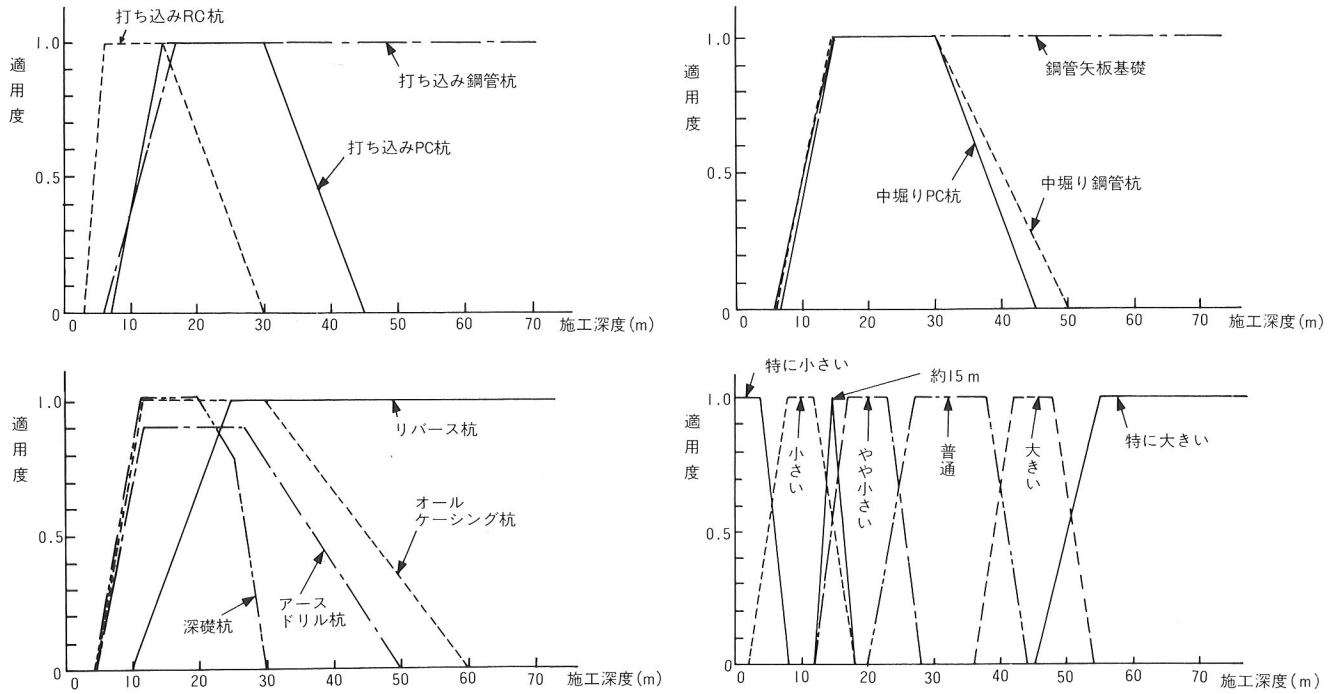


図-12 施工深度に対するメンバーシップ関数

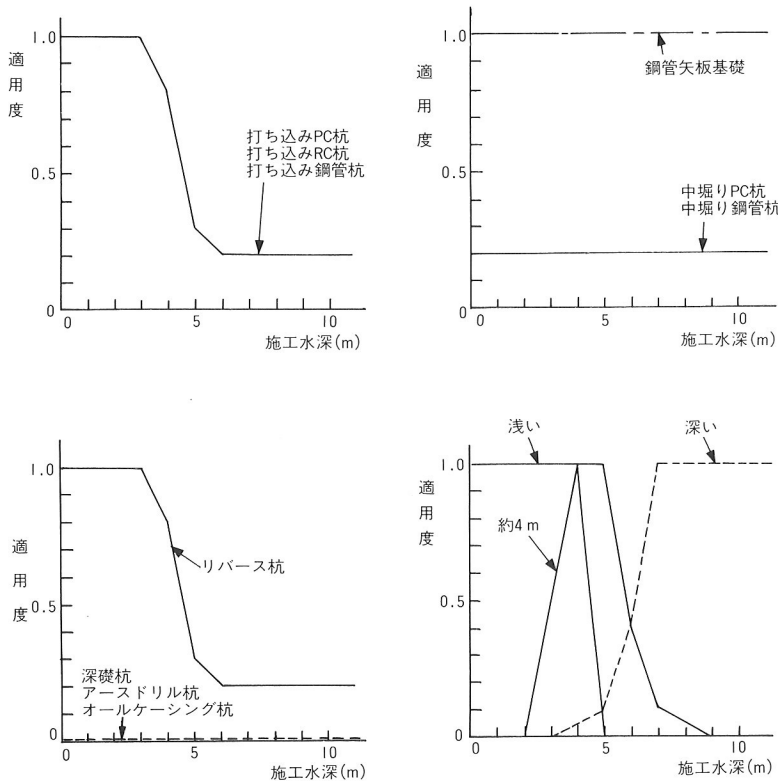


図-13 施工水深に対するメンバーシップ関数

表-3 ファジィ理論による杭形式の選定結果

打ち込み鋼管杭	0.934
鋼管矢板基礎	0.934
リバース杭	0.894
深礎杭	0.734
オールケーシング杭	0.734
打ち込みPC杭	0.632
打ち込みRC杭	0.632
中掘り鋼管杭	0.614
アースドリル杭	0.554
中掘りPC杭	0.542

表-4 本システムと比較設計案の工費の比較

工費内訳 算定方法	上部工工費 (万円)	下部工工費 (万円)	全体工費 (万円)
① 比較設計案	59700	26400	86100
② 本システム	62853	27003	89856
$(①-② /①) \times 100$	5.3	2.3	4.4

表-5 ホストコンピュータと図表から求めた下部工工費の比較

工費内訳 算定方法	P3橋脚工費 (万円)	下部工工費 (万円)
① ホストコンピュータ使用	2316	27003
② 図表使用	2475	28713
$(①-② /①) \times 100$	7.0	6.3

ら、従来の作業時間を $\frac{1}{2}$ 以下に短縮できると思われる。

6. 結論

まず、本システムの持つ機能に対して以下の結論が得られた。

- ① 河川構造令、鋼橋計画マニュアルなどの教科書的な知識のみでなく、熟練設計者の経験的な知識も取り入れることにより、実用的なシステムを作成することができた。
- ② 河川構造令を完全に反映した径間割を自動的に作成することができ、経験の少ない設計者の作業を大幅に軽減できると思われる。
- ③ 径間割と橋種の選定部分に設計者の判断を仰ぐ個所を設けることにより、より実用的なシステムを構築することができた。
- ④ 杭形式の選定にファジィ理論を用いることにより、土質や施工条件のあいまいさを十分表現することができた。
- ⑤ ワークステーションとホストコンピュータをオンラインすることにより、杭工費を正確に算定することができた。すなわち、ワークステーションとホストコンピュータとが得意としている作業をそれぞれに分担させることにより、さらに広がりを持ったエキスパートシステムが構築できた。

次に、本システムの構築に際し以下の知見が得られた。

- ① エキスパートシステムの使用者は、そのシステムの扱う分野の基本的な知識を持つ者でないと十分な活用は困難である。
- ② エキスパートシステムを構築するためには、専門家とナレッジエンジニアのほかに、両方の知識を持つ技術者が必要である。
- ③ ルールを作成する場合には、そのルールの性格に応じ「IF～THEN」の形とプログラムとの形に使い分けるべきである。

7. あとがき

エキスパートシステムの最も重要な問題として、知識ベースの更新がある。特に、本システムのように工費の算定を取り扱う場合には、知識ベースの更新は常になくなる。そのためには、エキスパートシステムの利用者が、簡単に知識ベースの更新を行えるような機能の充実を図ることが必要である。現在、これらに関して検討中であり、別の機会があれば報告したい。

最後に、本システムの構築に対して多大な協力をいただいた日本ユニシス㈱知識システム部の橋本和博氏に対し心より謝意を表したい。

参考文献

- 1) 大北・小川・田村：土木分野におけるエキスパートシステムの利用について、電算機利用に関するシンポジウム講演会、土木学会、pp.153～156、1984年10月。
- 2) 日経AI、pp.19～23、1989年1月16日。
- 3) 西土・前田・野村：河川橋梁の上下部工形式選定のためのエキスパートシステム構築に関する一考察、構造工学論文集、Vol.35A、pp.489～502、1989年3月。
- 4) 西土・前田・野村：橋梁形式選定のための実用的エキスパートシステム構築の実際と適用例、土木情報シンポジウム、1989年10月。
- 5) 中村・寺野：土木構造物エキスパートシステム、オーム社、pp.57～63、1987年。
- 6) 河川管理施設等構造令研究会編：解説・河川管理施設等構造令、日本河川協会、pp.275～326、1979年3月。
- 7) 西土・前田・野村：河川構造令に基づく橋梁上部工の形式選定における径間割について、土木学会第44回年次学術講演会講演概要集(I)、1989年10月。
- 8) 日本鋼構造協会編：鋼橋計画マニュアル、1985年3月。
- 9) 日本橋梁建設協会：デザインデータブック、1987年7月。
- 10) 土木設計エキスパート・システム研究会：報告書、1986年10月。
- 11) プレストレストコンクリート建設協会：PC道路橋概算工事費、1988年3月。
- 12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説・下部構造編、pp.166～167、丸善、1980年5月。
- 13) 寺野、浅居、菅野：ファジィシステム入門、オーム社、pp.17～55、1987年。