

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

A Study on Expert System for Type Selection of River Crossing Bridge

西土隆幸^{*}, 前田研一^{**}, 野村国勝^{***}

By Takayuki NISHIDO, Ken-ichi MAEDA and Kunikatsu NOMURA

Type selection of river crossing bridges should be done by expert designers who have many years of experience and wealth of knowledge, because this selection influences on pursuant design operation, fabrication and erection procedures. If those experts' knowledge can be supplied to other designers, there will be many merits on various points. Therefore, the authors developed an expert system for type selection of super and substructures, which has expert designers' knowledge and rule of codes as the knowledge base. The expert system uses the fuzzy set theory to express ambiguity, and utilizes the outline system between workstation and host-computer to increase accuracy of substructure cost.

1. まえがき

橋梁上下部工の形式選定は、橋梁の計画から架設までの一連の工程において非常に重要な位置を占めており、以後の作業に大きな影響を与えるものである。しかも、熟練設計者の長年の経験と豊富な知識なくして経済的、美観的に充分満足のいく選定は困難である。また、形式選定の妥当性や工費の算定精度のみでなく作業時間も設計者の熟練度により大きく異なる。したがって、熟練設計者の総合的な知識を他の設計者が有効に活用できれば、種々の点で大きなメリットが期待できる。著者らは、そのような観点から、現在あらゆる分野から注目されているエキスパートシステム¹⁾²⁾を応用して橋梁上下部工の形式選定(基本設計案)システムを構築し、実用化に向けて種々の検討を加えてきた。

上下部工の形式を選定していく過程の中で、例えば人間が持っている美観や直観など機械的に判断することが困難なものも多く、また、制約条件を満足する設計案は多数存在するが、この中からどの案を採用すべきかは技術的要素以外の要素も吟味して、最終的には人間が実際的であると思われる判断に委ねられる。そこで、最適な設計案を自動的に設計するものでなく、あくまでも設計者とシステムが対話しながら設計者の作業を支援するものとして位置付け、本システムを構築した。

この形式選定システムは、1次選定として複数案の形式を選定することができ、この選定結果を参考に、

-
- ^{*} 工修 川田工業株式会社技術本部中央研究室 (〒114 東京都北区滝野川 1-3-11)
 - ^{**} 工博 川田工業株式会社技術本部中央研究室長 (〒114 東京都北区滝野川 1-3-11)
 - ^{***} 工修 川田工業株式会社技術本部長 (〒114 東京都北区滝野川 1-3-11)

設計者がさらに種々の項目を詳細に検討して、最終的な形式を決定することを支援するためのものである。

また、橋梁上下部工の形式選定は、山岳、都市、河川等の架設地点により選定および設計条件が大きく異なるため、全ての架設地点に適用できる選定システムを作成することは、システム自体が非常に大がかりとなることから容易ではない。そこで、架設地点の適用範囲を限定し、その後、順次、他の架設地点にも適用できるようにシステムを拡張していくこととし、本システムでは、まず、河川橋梁を対象にした。

本システムの推論および選定方法に用いる知識ベースとしては、道路橋示方書、鋼橋計画マニュアル等の教科書的なルールと、熟練設計者の総合的な知識に基づく慣用的なルールとの両者のルールの他、河川橋梁特有の法令である“河川構造令”に基づくルールも取り入れた。特に、杭形式の選定に際しては、入力データの表現方法に、より柔軟性を持たせるためにファジィ理論を導入した。さらに、本システム用のワークステーション（日本UNISYS KS-303）とホストコンピュータ（日本UNISYS 2200シリーズ）をオンラインし、ホストコンピュータによる解析結果に基づいた推論を行えるようにし、工費の算定精度を高めるとともに、既存ソフトの有効利用を試みた。

なお、本システムでは、知識ベースの構築が容易なことからエキスパートシェル（KEE）³⁾を、またプログラミング言語としてLispをそれぞれ用いた。

本文は、以上の機能を持つエキスパートシステムの構築に関して、システムの概要と特色および比較設計の実例例を適用した場合の一考察について述べるものである。

2. 本システムのフロー

本システムの選定順序を図-1に示す。

本システムでは、まず上部工の形式選定（径間割、橋種）が行われ、それらの工費が算定される。その後、得られた結果（反力、構造形式（単純、連続ばり））に基づき下部工の形式選定（橋台、橋脚、基礎工、杭）が行われ、それらの工費が算定される。最後に全体工費から経済性が評価され、その順位付けが行われる。なお、入力等の作業はすべて対話方式で行われる。

図-1に従い、上部工、下部工に分けて本システムの内容および特徴について次章以降に具体的に説明する。

3. 上部工選定と工費の算定

(1) 径間割

上部工形式の選定に必要な地形、川幅、流量および全幅員、橋長等のデータ入力終了すると河川構造令⁴⁾に従い基準径間長、脚の設置禁止区域、5m緩和、高水敷の特例等の規定が適用され、径間割が行われる。これらの規定はルールの形で用いられる。5m緩和ルールを例として図-2に示す。

径間割は、まず最初に、基準径間長以上でかつ、基準径間長に最も近い等径間割となる径間数をNとすると、N、N-1、N-2の等径間に分割される。これは、基準径間長以上となる径間割は1径間からN径間までのN通りあるが、これまでの経済性等に基づく実績から考えたものである。

次に、それらの等径間割の結果、脚が設置禁止区域に入る場合には、禁止区域から出される。左右に高水敷および低水敷がある河川断面を対象とすれば、左右どちらかの禁止区域に脚が入る場合、あるいは、左右両方の禁止区域に脚が入る場合などがあり、それらをすべて考慮し、これまで経験的に行ってきた脚の出し

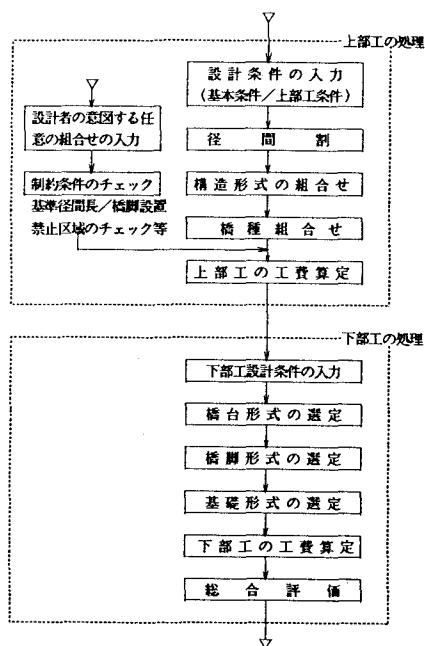


図-1 選定順序のフローチャート

方を20通り考えて、それらをルール化し適用した。図-3に脚の出し方の1例を示す。

以上の方法で得られたすべての径間割は、さらに画面表示され、設計者がケース数も参考に不適切なものを独自に判断して取り除くルーチンを経て、絞り込まれる。これは、前述した慣用ルールを適用しても不適切な組合せを完全に削除できるルーチンを完備することが困難であると同時に、適切なものまで削除される危険性もあると考えたからであり、ケース数が過大な場合には、これにより以後の選定、算定等の作業時間の短縮も可能である。

なお、これらの径間割の中に設計者が希望するものがない場合も考慮し、設計者が任意の径間割を入力できるルーチンも加えた。

(2) 橋種の選定

前節で採用された各ケースの径間割に対し、橋種の選定がここで行われる。本システムで採用した橋種を図-4に示す。この図は知識ベースの木構造の一部である。まず、デザインデータブック等^{5) 6) 7)}を参考に、左右の高水敷、低水敷の径間長に適用できる橋種が当てはめられた後、構造的な制約や設計者が経験的に行っている方法をルールの形で表現することによって、可能な限り橋種の組み合わせ数が絞り込まれるようになっている。本システムでは、橋種の組み合わせ数を約1/2に絞り込むことを目標とした結果、使用したルールは約50種(本システム全体では約150種)となった。ルールおよび知識ベースは、上部工、下部工の熟練設計者各々1名から獲得した。橋種選定のためのルールの一部を以下に示す。

構造特性からの制約

- ①異なる種別(鋼橋、PC橋、アレービーム橋)は混在できない。
- ②単純合成箱桁と単純非合成箱桁の組み合わせはできない。
- ③単純鋼床版I桁と単純鋼床版箱桁の組み合わせはできない。
- ④橋種が桁橋以外であるとき異なる橋種の組み合わせはできない。

5m緩和の規定(原文)：

「ただし、径間長を次の式によって得られる値(注：基準径間長)以上とすればその平均値を基準径間長に5メートルを加えた値を超えるものとしなければならないときは、径間長は、基準径間長から5メートルを減じた値(30メートル未満となるときは30メートル)以上とすることができる。」

「5m緩和の規定」のルール表現：

```

( IF ( AND ( AND ( THE 基準径間長 OF 上部工定数 IS ?基準径間長 )
                ( THE 橋長 OF 基本条件 IS ?橋長 )
                ( THE 最大径間数 OF 上部工定数 IS ?最大径間数 ) )
      ( AND ( > ( / ?橋長 ?最大径間数 ) ( + ?基準径間長 5 ) )
            ( OR ( AND ( > ( - ?基準径間長 5 ) 30 )
                  ( > ( / ?橋長 ( + ?最大径間数 1 ) ) ( - ?基準径間長 5 ) ) )
              ( AND ( < ( - ?基準径間長 5 ) 30 )
                    ( > ( / ?橋長 ( + ?最大径間数 1 ) ) 30.0 ) ) ) ) )
      DO ( PUT .VALUE '上部工定数 '最大径間数 ( + ?最大径間数 1 ) ) )

```

図-2 「5m緩和の規定」のルール表現

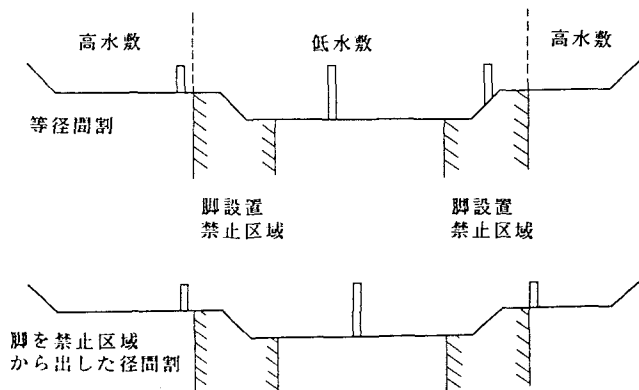


図-3 脚を禁止区域から出す方法の1例

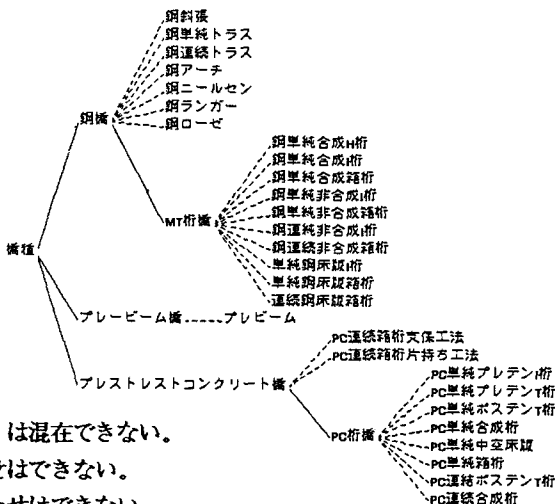


図-4 本システムで採用した橋種

熟練設計者の経験則

- ① 4種類以上の橋種の組み合わせは作らない。
- ② 径間長が左右対称のときは橋種の並びも左右対称とする。
- ③ 箱桁の径間長はI桁の径間長以上とする。
- ④ 鋼斜張橋を適用できる径間長で数径間連続となる場合は鋼斜張橋を適用する。

なお、径間割と同様の理由により、絞り込まれた橋種をすべて画面表示し、不適切なものを取り除いてさらに絞り込むルーチン、および、設計者の希望する橋種がない場合には、図-4の中から任意の橋種を入力できるルーチンも加えた。

(3) 上部工工費の算出

径間割と橋種の選定が終了すれば、それぞれの組み合わせに対して上部工工費が算定される。工費は、すべてデザインデータブック等^{5) 6) 8)}の図表から算定される。本システムでは、鋼橋の場合には、上部工工費を製作費、輸送架設費、橋面工費、現場塗装費に分けて算出できるようにした。

4. 下部工選定と全体工費の算定

(1) 橋台、橋脚の形式選定

上部工の形式選定と工費の算定が終了すると、図-5に示すような橋台の形状に関するデータを入力することにより、鋼橋計画マニュアル⁶⁾を参考に、表-1に従い経済的となる橋台、橋脚の形式が選定される。

(2) 基礎工と杭形式の選定

基礎工選定のための入力項目を表-2に、選定される杭形式を図-6に示す。この図は知識ベースの木構造の一部である。

基礎工の選定は、一般に、施工地点の土質あるいは施工条件を道路橋示方書（下部構造編）の基礎形式選定図表に当てはめて、最終的には熟練設計者の判断により行われている。

しかし、土質試験等により得られる結果は、あくまでも施工地点の平均的な値であり、その値には、あいまいさを持っている。また、基礎形式選定図表の“施工深度”を例にとると、“施工深度”が15~25mのときには、深礎杭に対して“実績が多い”、一方、25~40mのときには、“実績がほとんどない”となっている。もし、“施工深度”が25mという試験結果が得られる場合には、この25mを選定図表のどちらの選定要素に含めるかで、最終的には、熟練設計者の選定した杭形式とは、異なる結果となることも考えられる。このような理由から、本システムの推論過程の中で、最も多くのあいまいさを含んでいるのは杭形式の選定である。

あいまいな状態を表現する方法としてCF（Certainty Factor）値を用い、いわゆる、MYCIN流の計算法による推論を行った例がすでに報告され、多くの有用な成果を与えているが^{9) 10) 11)}、各々のCF値を合成して求められた最終的なCF値が実際の確信の度合いと異なる可能性があること、また、推論方法

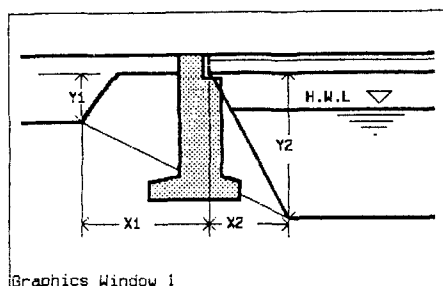


図-5 橋台の形状入力

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	$15 \text{ m} < h$

に対する理論的根拠に問題が残されており、ファジ理論¹²⁾¹³⁾の導入の検討も必要であるとされている。

そこで本システムでは、杭形式の選定に当って、CF値を用いる場合の問題点を解決でき、あいまいさもあり

柔軟に表現できるファジ理論の適用を考えることにした。

以下に本システムに用いたファジ理論¹⁴⁾について述べる。

a) 選定要素のファジ表現

まず、あいまいさを含んだ選定要素をファジ集合で表現する。台集合Xのファジ部分集合をAで表わせば、Aは式(1)のようなメンバシップ関数 μ_A によって定義される。

$$\mu_A : X \rightarrow [0, 1] \quad (1)$$

すなわち、Xの要素 X_i がAに含まれる程度 $\mu_A(X_i)$ によって定量的に定義され、 $\mu_A(X_i)$ が1に近ければ X_i のAに属する度合い(グレード)が高いことを示している。

台集合Xが有限の場合には、Aは式(2)のように表わされる。この式の斜線の右側は台集合の要素を、左側はグレードを示している。+の記号は「または」の意味である。

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=1}^n \mu_A(X_i) / X_i, \quad X_i \in X \\ &= \mu_A(X_1) / X_1 + \mu_A(X_2) / X_2 + \cdots + \mu_A(X_n) / X_n \end{aligned} \quad (2)$$

例えば、施工深度を例にとり、道路橋示方書の基礎形式選定図表に従って、施工深度が「特に小さい(2~5m)」、「小さい(5~15m)」、「やや小さい(15~25m)」、「普通(25~40m)」、「大きい(40~50m)」、および、「特に大きい(50~60m)」という6項目の選定要素に分類する。この中で施工深度が「大きい」という状態をファジ集合で表現すれば式(3)のように表わせ、具体的には図-7のようになる。

なお、式(3)以降のメンバシップ関数の値は、すべて熟練設計者の経験に基づき決められたものであり、基礎形式選定図表の評価値をそのまま表現したものではない。

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=1}^n \mu_A(X_i) / X \\ &= 0/0 + 0/1 + \cdots + 0/36 + 0.2/37 + 0.35/38 + 0.5/39 + 0.66/40 + \\ &\quad 0.85/41 + 1.0/42 + \cdots + 1.0/48 + 0.8/49 + 0.64/50 + 0.5/51 + \\ &\quad 0.34/52 + 0.15/53 + 0/54 + \cdots + 0/70 \end{aligned} \quad (3)$$

ここでは、台集合 $X = \{0, 1, 2, \cdots, 70\}$ であり、施工深度の集合に対応している。

表-2 基礎工の選定要素

中間層の地質	
中間層の硬さ(N値)	
支持地盤の凹凸	
水上施工	
鉛直荷重(径間長)	
施工深度	
近接構造物への影響	
水平荷重	
レキ径	その他

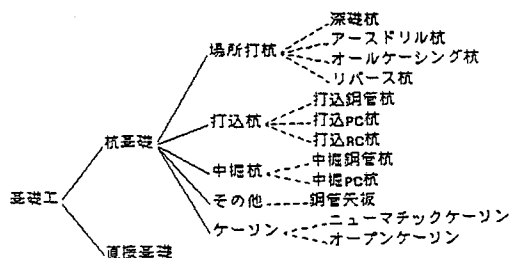


図-6 本システムで採用した基礎形式

b) 選定要素と杭のファジィ関係

次に、ファジィ集合で表現された各選定要素に対する杭ごとの選定可能性を求める。そのためには、例えば施工深度が「大きい」というファジィ集合に対する杭ごとの選定可能性を、ファジィ集合で表現すればよい。しかし、施工深度が「大きい」という表現は漠然としており、それに対応した杭ごとの選定可能性を直接決定することは困難であると考えた。そこで、以下に述べる順序により、杭ごとの選定可能性を求めることにした。

まず、杭の集合をYとすると、XとYとのファジィ関係Rは式(4)のように表されるファジィ集合であり、そのメンバシップ関数は式(5)のように表わされる。ここで、X、Yはともに有限な集合であるので、ファジィ関係Rは式(6)のように表わされる。具体的に打ち込みPC杭を例にとると、施工深度(0-70m)に対する選定可能性は図-7のようになる。

$$R = X * Y = \{(X_i, Y_i) \mid X_i \in X, Y_i \in Y\} \quad (4)$$

$$\mu_R : X * Y \rightarrow [0, 1] \quad (5)$$

$$R = \begin{bmatrix} \mu_R(X_1, Y_1) & \cdots & \mu_R(X_1, Y_n) \\ \vdots & & \vdots \\ \mu_R(X_n, Y_1) & \cdots & \mu_R(X_n, Y_n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

次に、上述のファジィ関係Rに施工深度が「大きい」を表わすファジィ集合Aを合成し、施工深度が「大きい」に対する杭ごとの選定可能性を求める。すなわち、式(7)のような関係が得られる。

$$B = A \cdot R \quad (7)$$

ここで記号 $\cdot$ は合成を意味する。AとRを合成したファジィ集合Bのメンバシップ関数は式(8)のように定義される。

$$\mu_B(Y_i) = \bigvee_x \{ \mu_A(X_i) \wedge \mu_R(X_i, Y_i) \} \quad (8)$$

ここで記号 $\vee$ は max、 $\wedge$ は min を意味する。式(7) および式(8) を具体的に表わせれば図-8のようになる。

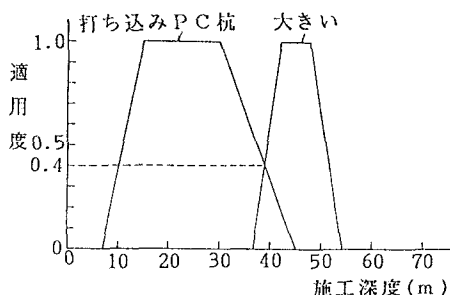


図-7 施工深度が「大きい」場合に対する
打ち込みPC杭の選定可能性

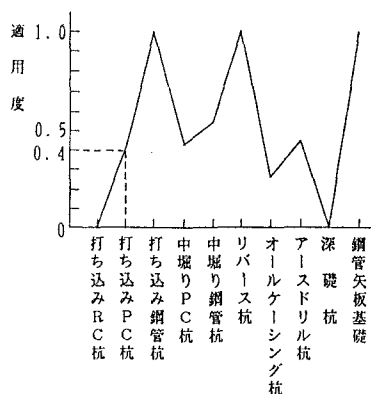


図-8 施工深度が「大きい」場合の各杭の選定可能性

この図から例えば、施工深度が「大きい」に対する打ち込みP C 杭の選定可能性は 0.40となる。したがって、各々の杭について求めれば杭ごとの選定可能性が得られることになる。これを式(9)のように表現する。

$$A \Rightarrow B \quad (9)$$

c) ファジィ推論

ファジィ推論は、この場合には、任意の選定要素に対して杭ごとの選定可能性を求めることである。すなわち、同様に、施工深度を例にとり、例えば、施工深度が「約35m」というあいまいな表現を入力データとして、それに対応するファジィ集合A' に対する杭ごとの選定可能性B' を求めることを考えれば

規 則 : $A \Rightarrow B$ 施工深度が「大きい」に対する杭ごとの選定可能性

事 実 : A' 施工深度が「約35m」

結 論 : B 杭ごとの選定可能性は？

となる組み合わせを求めることである。この関係を表わせば式(10) のようになる。

$$B' = A' \cdot (A \Rightarrow B) \quad (10)$$

式(10) のB' をメンバシップ関数で表わせば式(11)のようになる。

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(Y_i) &= \bigvee_x \{ \mu_{A'}(X_i) \wedge [\mu_A(X_i) \Rightarrow \mu_B(Y_i)] \} \\ &= \bigvee_x \{ \mu_{A'}(X_i) \wedge [\mu_A(X_i) \wedge \mu_B(Y_i)] \} \\ &= \bigvee_x \{ \mu_{A'}(X_i) \wedge \mu_A(X_i) \} \wedge \mu_B(Y_i) \end{aligned} \quad (11)$$

ここでは、Mamdaniの方法により、

$$A \Rightarrow B = A \wedge B \quad (12)$$

なる変換式を用いた。式(11)の下線部はA' とAの適合度を示し、結果のB' は、この適合度とBとの min を取ることによって得られることを表している。それを図-9に示す。

なお、ここでは施工深度が「大きい」場合の「約35m」の杭ごとの選定可能性を求めたが、施工深度の残りの選定要素（「小さい」・・・「普通」など）に対しても同様の方法で 杭ごとの選定可能性を求める。そして 施工深度が「約35m」の最終的な杭ごとの選定可能性は、各選定要素の杭ごとの選定可能性の最大値を取ればよい。ま

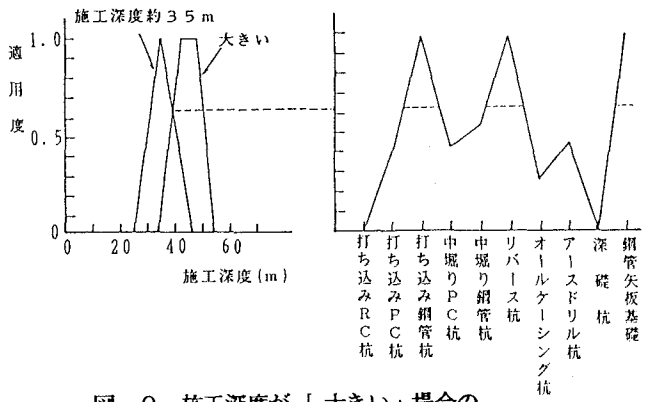


図-9 施工深度が「大きい」場合の「約35m」のときの杭ごとの選定可能性

た、中間層のN値、レキ径などのその他の項目に対しても同様の方法で求め、各項目に対し重み付けをし、すべての項目に対する杭ごとの選定可能性の平均値を求め、その値が最大となる杭を最適な杭とする。

(3) 下部工工費の算定

橋台、橋脚および杭の形式選定が終了すれば、下部工工費が杭形式を除いて、鋼橋計画マニュアルの図表により算定される。なお、本システムでは、各橋台、橋脚ごとに本體工費、杭工費、掘削／締切工費に分けて算定できるようにした。

杭形式に関しては、鋼橋計画マニュアルの図表により工費を算定すると誤差が大きくなることがあるため、本システム用の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し、ホストコンピュータで構造解析を行った結果に基づき、工費を算定する方法を取ることにした。ただし、図表による方法も可能である。

すなわち、まず、杭形式の選定結果から得られた上位3つの杭形式に対して、表-3のように径が変えられ、それぞれの組み合わせ（杭形式と杭径）ごとに既存のホストコンピュータ用の構造解析プログラムを用い、橋台、橋脚の安定および断面計算、杭の所要本数が計算される。次に、それぞれの組み合わせに対して計算された杭の所要本数に杭長と単価を乗じ、最も経済的となる杭形式が最終的に選定される。その際、構造解析用の入力データは、すべてワークステーション上で自動的に作成される。

(4) 全体工費の計算と評価

上下部工の工費を合計することにより全体工費が求められる。その結果、すべての組み合わせに対して全体工費の最も安価となるものが「経済性1位」と評価される。以下、全体工費に基づき順位付けが行われる。なお、参考資料として走行性、保守性について、

①走行性：ジョイントの数に従い「優位」（優れている）、「中位」、「劣る」

②保守性：鋼橋に対し「塗装の塗り替えが必要」、PC橋に対し「防食法に留意すること」という表示をそれぞれ行うようにした。

5. 適用例と考察

図-10に示すような比較設計案と同じ設計条件を、本システムに入力し、杭工費をホストコンピュータで

表-3 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 中掘りPC杭 中掘り鋼管杭	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

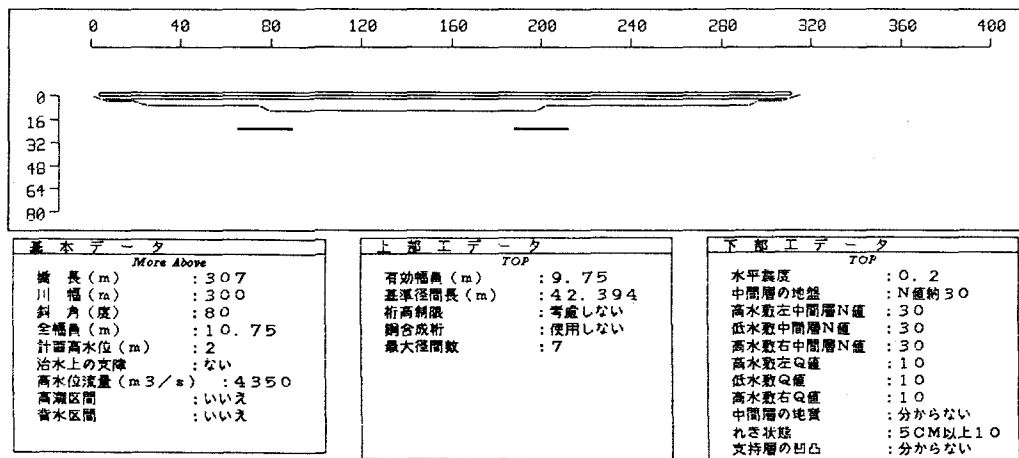


図-10 比較設計案の設計条件

計算した場合の選定結果の一部を図-11に示す。この選定結果は、比較設計案の中から最終的に選定された形式に最も近いものである。この結果に基づき以下にその考察を行う。

(1)径間割と橋種の選定

本システムでは30通りの径間割と橋種の組み合わせ（PC橋 12 案、鋼橋 18 案）が求められた。なお、PC橋の場合にも図-11の鋼橋と同じような項目についての結果が得られた。また、本システムで経済性が1位となる形式は、7@43.86mの径間割のPC単純ボス騰T桁であったが、この形式は走行性等を考慮して比較設計案では対象とされなかったものである。図-12に比較設計案と本システムで得られた径間割と橋種の組み合わせの1例を示す。

それらの組み合わせの中で比較設計案（全10案）の径間割とまったく同じ径間割となるものは得られなかったが、ほぼ等しい径間割は得られた。この理由として設置禁止区域から脚が出される場合、例えば禁止区

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-11 適用例の選定結果

図-11 適用例の選定結果

	径間数	2	3	2
比較設計案	径間長	61.2	180.0	65.8
本システム		60.8	181.0	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	

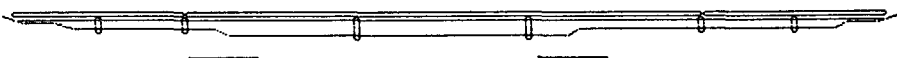


図-12 比較設計案と適用結果の径間割

域の境界線上、境界線から1 mあるいは1.5 mの位置など、あらゆる方法が考えられるが、本システムでは、禁止区域の境界線上に脚を出すことにしており、一方、比較設計案では、美観等も考慮した設計者の判断で脚の移動位置を微妙に変化させているためである。しかし、本システムで求められた結果を参考にして、設計者の希望する径間割を、再度入力することでこの問題は十分対処できると思われる。

なお、橋種の選定に対しては、比較設計案と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

比較設計案は、表-4に示すような5項目の土質あるいは施工条件を持っていた。このような条件を前述した道路橋示方書の基礎形式選定図表に当てはめ、その結果のみから杭形式を選定するには無理がある。実務では、その選定図表から求められる結果をさらに熟練設計者が考慮し、経済性も検討し、最適な杭形式を決定している。

本システムでは、ファジィ理論を導入したため、杭形式の選定の際にこれらの土質あるいは施工状態を、容易に、かつ正確に表現することができた。これらの項目に対して本システムで取り扱える表現方法を表-5に示す。なお、この表は、選定図表の選定要素に独自に設けた選定要素を加えたものである。また、これらの項目のメンバシップ関数（これらは、すべて熟練設計者の経験から決められたもの）を図-13～17に示す。

これらのメンバシップ関数と表-4の各入力項目の条件に従い、図-9に示す方法から、杭ごとの選定可能性（適用度）の平均値が計算された。その計算結果を表-6に示す。さらに、この表の上位3つの杭形式に対して、ホストコンピュータを用いて最も経済的となる杭形式と杭径が選定されたが、その結果はリバース杭の1200mmとなり、実際の比較設計案で選定された杭形式と一致した。これらの結果より、ファジィ理論による杭形式の選定は、十分妥当であるといえる。

(3) 工費の算定

本システムでは、ファジィ理論とホストコンピュータによる構造解析とを組み合わせた選定結果から、最も経済的となる杭形式と杭径の他、橋台、橋脚のフーチングの寸法も求められる。そのため、より高い精度で掘削／締切工費も算定される。

表-5 ファジィ理論による表現方法

入 力 項 目	道示の分類に基づく選定要素	入力方法
中間層のN値	非常に軟弱 — 軟 弱 — 普 通 — 硬 い —	1. N値そのもの 2. おおよそのN値 3. 判断項目そのまま 4. 判断項目を重複
レキ径	特に小さい (0～5cm) 小さい (5～10) 普 通 (10～50) 大きい (50～)	1. レキ径そのもの 2. おおよそのレキ径 3. 判断項目そのまま 4. 判断項目を重複
鉛直荷重 (径間長)	小さい (0～20m) 普 通 (20～50) 大きい (50～100) 特に大きい (100～)	1. 径間長そのもの 2. おおよその径間長 3. 判断項目そのまま 4. 判断項目を重複
施 工 深 度	特に小さい (2～5m) 小さい (5～15) やや小さい (15～25) 普 通 (25～40) 大きい (40～50) 特に大きい (50～60)	1. 深度そのもの 2. おおよその深度 3. 判断項目そのまま 4. 判断項目を重複
水 上 施 工	浅 い 5m未満 深 い 5m以上	1. 水深そのもの 2. おおよその水深 3. 判断項目そのまま 4. 判断項目を重複

表-4 比較設計案の
土質および施工条件

中間層の地盤	N値約30
レキ径	5 から 10cm
鉛直荷重 (径間長)	約60m
施 工 深 度	約15m
水 上 施 工	約 4 m

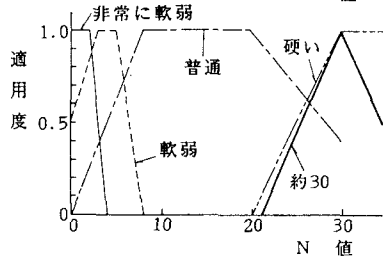
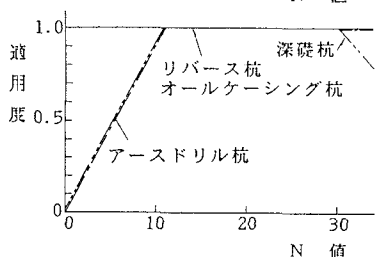
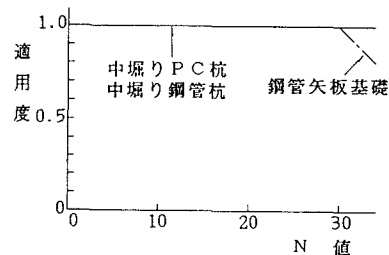
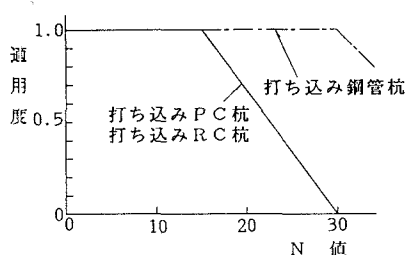


図-13 中間層のN値に対するメンバシップ関数

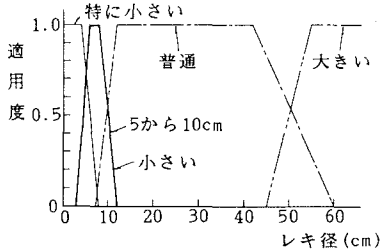
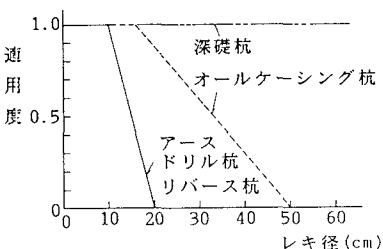
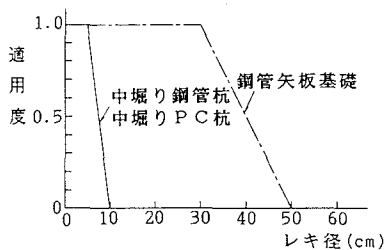
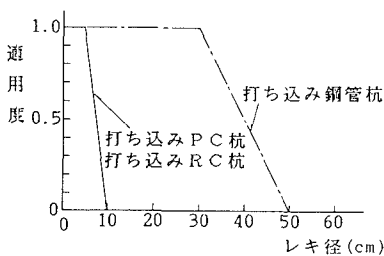


図-14 レキ径に対するメンバシップ関数

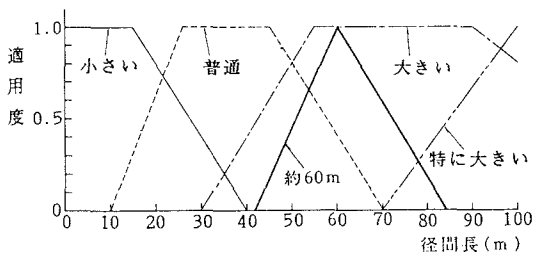
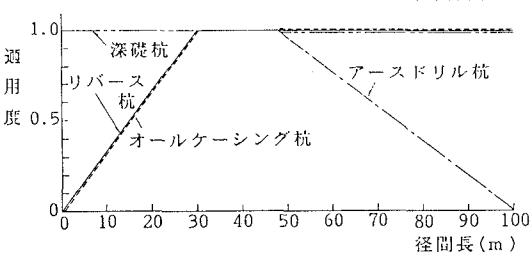
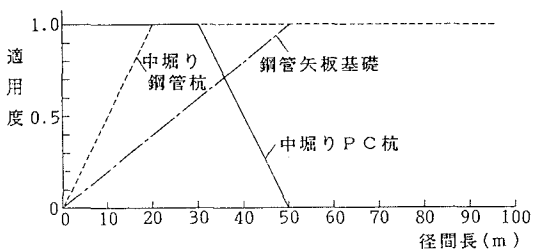
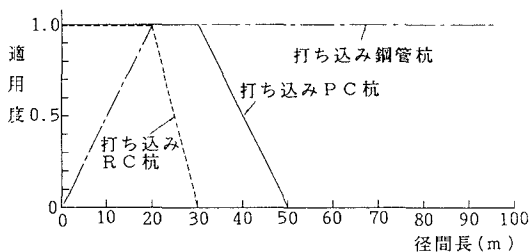


図-15 鉛直荷重(径間長)に対するメンバシップ関数

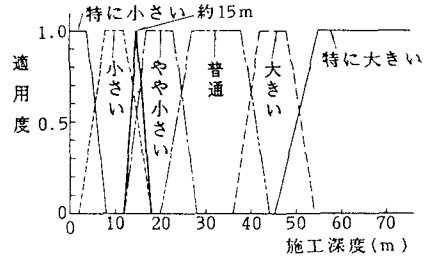
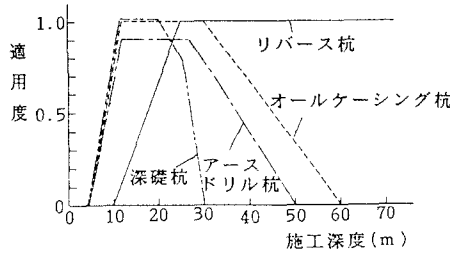
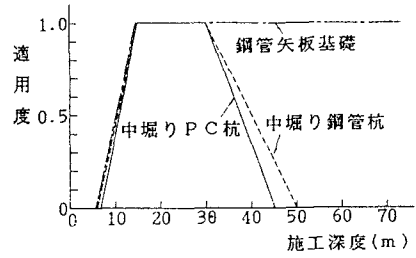
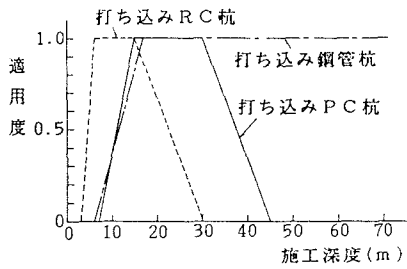


図-16 施工深度に対するメンバシップ関数

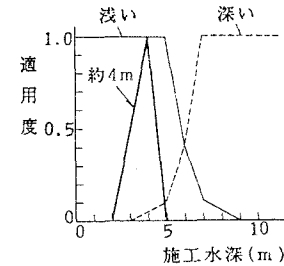
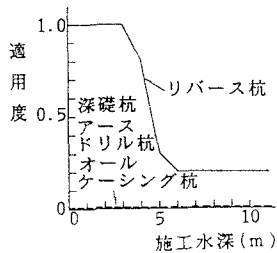
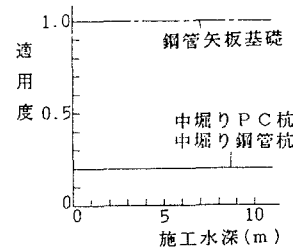
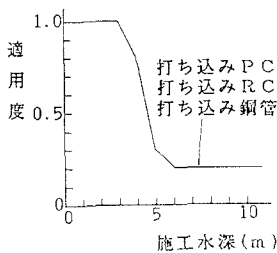


図-17 施工水深に対するメンバシップ関数

本システムで得られた結果(図-11)と比較設計案で求められた上下部工それぞれの工費、および全体工費を表-7に示す。また、下部工工費がホストコンピュータを用いて算定された場合と、鋼橋計画マニュアルの図表から算定された場合の比較を、P3橋脚、および下部工全体を対象とし、表-8に示す。

これらの結果から、上部工工費は、図表を用いることにより、また、下部工工費は、ホストコンピュータを用いることにより、実用上十分な精度の算定が可能であるといえる。

表-6 ファジイ理論による
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

(4) 選定および算定時間

この適用例で、ホストコンピュータを用いて下部工工費を算定する場合の上下部工を含めた全計算時間は、約8時間となった。しかし、ホストコンピュータで計算を行っている間に他の作業も平行して進めることができ、また、実業務の計算量に比べればかなりの省力化となるため本システムを用いることにより、比較設計業務の大幅な時間短縮が見込まれる。

一方、図表のみを用いて下部工工費を算定する場合の上下部工を含めた全計算時間は、約2時間であった。したがって、比較設計が要求する精度によっては、この方法を取ることによって合理的な対処が可能である。

なお、橋台、橋脚1ヶ所当りの計算時間は約3分である。

表ー 7 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

表ー 8 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	2313	27003
② 図表使用	2475	28713
$(① - ② / ①) \times 100$	7.0	6.3

6. 結 論

- (1) 径間割および橋種の選定を設計者が行うルーチンも加えたため、自動的にそれらの選定結果が得られるシステムとはならないが、設計者の考えが反映でき、より実用的なシステムとすることが可能となった。
- (2) 杭形式の選定にファジィ理論を用いることにより、土質状態および施工状態の表現に柔軟性を持たせることができた。また、熟練設計者の知識を正確に表現したメンバシップ関数を用いることにより、理論的に根拠を有する方法で杭形式を選択でき、その結果も十分妥当なものであった。
- (3) 本システム用の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し、既存のホストコンピュータ用の構造解析プログラムを用いることにより、信頼性の高い杭形式の選定と下部工工費の算定精度を高めることができた。
- (4) 本システムを用いることにより、比較設計業務の大幅な時間短縮と省力化が可能となった。また、設計者が径間割と橋種を独自に入力できるようにもしたことから、選定不可能となる特殊な形式の上下部工の工費の算定および下部工形式の選定においても省力化が可能となった。

なお、今後の課題として以下の項目がある。

- (1) 現時点では経済性のみを対象として評価を行っているが、走行性、保守性さらに景観性や施工性を含めた総合的な評価が必要である。
- (2) 施工条件に従って最適な架設工法を選定できるエキスパートシステムを加え、それぞれの架設工法を用いた場合の工費を算定することにより、架設費の精度をより高める。

これらの課題に対処していくことは勿論のこと、本システムを実務に使用しながら知識ベースの改良、追加も行っていく予定である。最後に本システムの構築に当たり、種々の技術的な支援をいただいた日本ユニス㈱の橋本和博氏に心より感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 上野晴樹 : 知識工学入門, オーム社, 1985年
- 2) 古田均, K. S. Fu, J. T. P. Yao : 知識工学—エキスパートシステム—の構造工学への応用, 土木学会誌, PP28-33, 1985年 9月.
- 3) 日本ユニシス㈱ : K E E 使用説明書, 1987年 8月.
- 4) 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, PP275-326, 1979年 4月.
- 5) 日本橋梁建設協会 : デザインデータブック, 1987年 7月.
- 6) 日本鋼構造協会編 : 鋼橋計画マニュアル, 1985年 3月.
- 7) 土木設計エキスパート・システム研究会 : 報告書, 1986年10月.
- 8) プレストレスコンクリート建設業協会 : PC道路橋概算工事費, 1988年 3月.
- 9) 三上市蔵, 松井繁之, 田中成典, 新内康芳 : 道路橋鉄筋コンクリート床版の損傷要因推定のための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.34A, PP551~562, 1988年 3月.
- 10) 白石成人, 古田均, 中島裕之, 山本信哉 : 橋梁計画設計のためのエキスパートシステム構築に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.34A, PP667-675, 1988年 3月.
- 11) 中村秀治, 寺野隆雄 : 土木構造物エキスパートシステム, オーム社, PP35-43, 1987年.
- 12) 白石成人, 古田均 : ファジィ集合論の構造工学への応用, 土木学会誌, PP63-67, 1984年 6月.
- 13) 白石成人, 古田均, 吉住先司 : 構造設計へのファジィ意思決定理論の応用に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.33A, PP819-828, 1987年 3月.
- 14) 寺野寿郎, 浅居喜代治, 菅野道夫 : ファジィシステム入門, オーム社, PP17-55, 1987年.

(1988年10月12日受付)