

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

岩松幸雄*・早川裕史**・原田隆郎***

近年、土木設計におけるコンピュータ利用はCADのみならず、エキスパートシステムにも適用されてきた。しかし、それらは橋梁全体を対象にして複数の評価要素を考慮する比較設計のような、設計者の総合的な知識経験を必要とするものではなかった。本研究では橋梁の上部工、下部工、そして基礎工を対象に、経済性、施工性、環境適合性等の複数の評価要素を組み込んだエキスパートシステムを提案した。そして、過去に実施された比較設計と比較することによって本システムの有効性を検証した。

Keywords : expert system, comparative design for bridge, artificial intelligence, knowledge engineering

1. はじめに

土木構造物の設計は、従来より構造力学による力学的安全性の理論的解析を中心に行われ、その他の補完は、示方書、基準類と設計者の構造物設計に関する知識、経験を援用して行われてきた。したがって、熟達した技術者はそれでも十分に事業目的や環境に適合する成果を得ることも可能であったろうし、また、そこでは力学的安全性の確認以外の評価は潜在的に行われていたといえよう。

つまり橋梁の現行力学設計は橋梁上部工の各メンバー、下部工、基礎工、基礎周辺の地盤等々が同一モデルで解けるほど総合的で精緻なモデルアナリシスが可能でもないし、また安全で、安心でそして安定した構造物を導出するための力学的設計は構造物設計の大前提であるとしても、全体ではありえないことは論を待たない¹⁾。

このように橋梁設計の場合でも構造物の構成諸元をなるべく多く同一土俵で操作するとともに、目的関数である評価要素についても力学的安全性の他に経済性、機能性、環境適合性等々の項目の各指標を時系列的な側面と共に内部、外部の影響効果の観点からも同一土俵で論じる必要もあろう。加えて、構造物の設計技術もハイレベルになり、これとて同レベルに各評価項目を修得することは1人の技術者にとって至難のことと言わざるを得ない。

このような背景のもと、AI研究の応用分野のひとつであるエキスパートシステムによって、従来システムでは扱えなかった人間の経験や勘に頼って解決していた問

題までもシステム化できるようになり、専門家の経験や勘に頼る部分が多くある土木分野でも、調査、計画、設計、施工および管理の各分野においてエキスパートシステムの研究・開発が盛んに行われるようになった。

そこで本研究は、従来、熟達した技術者が潜在的に行っていたであろう土木設計の設計行為の中でも橋梁全体の比較設計段階を研究対象にした。橋梁の比較設計段階においては、技術者の持っている感性や直感といったヒューリスティックな分野や機械的に判断することが困難なものが多く、また制約条件を満足する代替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する必要がある。このような観点から、本研究では、データを入力しさえすれば橋梁形式の最適案が自動的に導出されるというのではなく、設計者がシステムと対話しながら、設計者の意向を組み込んだ形で作業を支援することによって比較設計の合理化を図るものと位置づけ、システム開発を行った。

そして、本研究のような土木設計分野のエキスパートシステムは、単独のシステムとして開発するのではなく、CADによる詳細設計システム等の既存のシステムと併用することによって、適用の可能性が広がると考えられる。

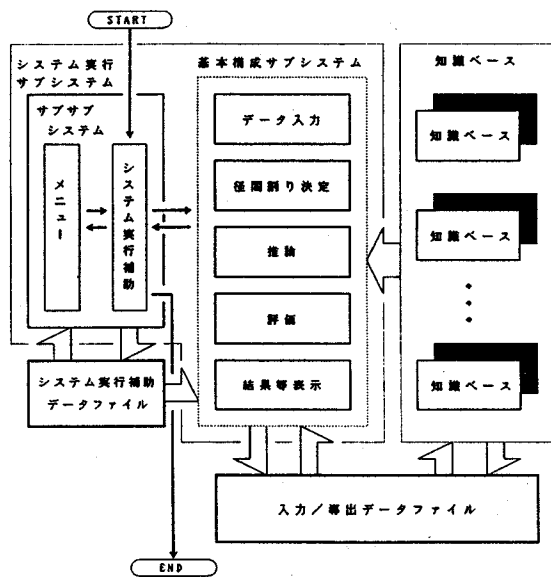
2. 橋梁の比較設計支援エキスパートシステムの概要

本システムは、比較設計の考え方をもとに橋梁の径間割りおよび上下部工を一体として橋梁の形式選定を行うシステムである。本システムの開発に当たっては、茨城大学を中心に土木研究所、(株)長大、東芝情報システム(株)が参加した「AI研究会(会長：岩松幸雄教授)」が編成され、昭和62年度から活動を行っている^{2),3)}。当研究会では、プロトタイプシステムの構築から始まり、トップダウン、ボトムアップの双方からシステムの

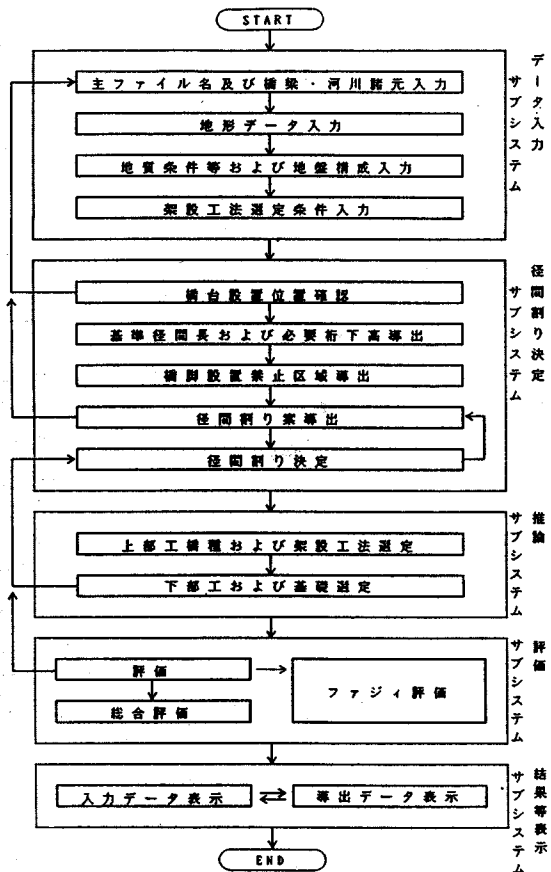
* 正会員 工博 茨城大学教授 工学部都市システム工学科 (〒316 日立市中成沢町4-12-1)

** 正会員 工修 (株)長大 情報システム部

*** 学生員 茨城大学大学院 工学研究科建設工学専攻



図一 本システム全体のフロー



図二 本システムの基本構成のフロー

表一 上部工対象橋種表

本システムでの名称	正式橋種名
プレート ガーダー橋	非活荷重合成単純桁橋 非合成連続I桁橋 単純合成I桁橋 活荷重合成単純H型鋼橋
ボックス ガーダー橋	活荷重合成単純桁橋 非活荷重合成単純桁橋 連続鋼桁橋
P C 橋	プレテンション方式PC単純床版橋 プレテンション方式PC単純中空床版橋 プレテンション方式PC単純T桁橋 ボストン方式PC単純桁橋 PC連続鋼桁橋
R C 橋	中空床版 R C中空床版橋
トラス系橋	単純トラス 連続トラス
アーチ系橋	アーチ アーチ橋

(注) P C 桁橋は非合成のみであるから非合成を省略した。

表二 架設工法対象工法

- ① 自走クレーンによるベント工法
- ② ケーブルクレーンによる吊工法
- ③ 送出し工法
- ④ 支保工式架設工法
- ⑤ 張出し架設工法
- ⑥ 押し出し架設工法
- ⑦ クレーン架設工法
- ⑧ エレクションガーダ式架設工法

チェックを行い、毎年度末に不満足でもシステムを完結させるローリングシステムでバージョンアップしていく方針で研究、開発を行っている。

本システムの構成は、

- ① データ入力サブシステム
- ② 径間割り決定サブシステム
- ③ 推論サブシステム
- ④ 評価サブシステム
- ⑤ 結果等表示サブシステム

の5つからなる基本構成部分とシステムの実行を管理するシステム実行・管理サブシステムおよび知識ベースからなっている。ここで図一にシステム全体のフローを、また図二にシステムの基本構成フローを示す。

また、本システムは、実行機種を 32 bit Laptop Computer 「J-3100 SGT 101」とし、エキスパートシステム構築支援ツールには東芝情報システム(株)のエキスパートシステムシェル「Shell-Sunday」を用い、数値処理およびグラフィックス関係については、外部プログラムとして BASIC を用いて構築を行った。

3. システムの対象範囲

本システムは橋梁の予備設計のうちでも径間割り以降の業務を対象にしている。したがって、路線、路線高さ、橋長の決定は与件的な扱いとしている。

対象とする上部工形式、架設工法及び下部工形式はそれぞれ表一～三に示す通りである。また、システムを構築していく上で以下のような制限、制約を設定した。

表-3 下部工対象形式

橋台	重力式 逆T式
橋脚	張り出し式（円形柱、小判柱、矩形柱） 壁式（矩形、小判）
基礎	直接基礎 打ち込み杭（P C、鋼管） 中掘り杭 場所打ち杭（リバース、アースドリル、 オールケーシング、深礎）

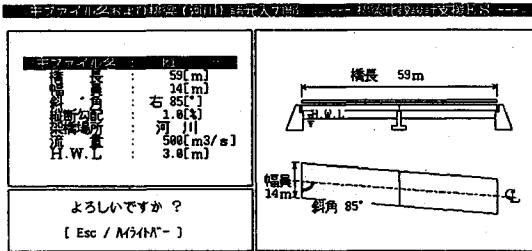


図-3 主ファイル名および橋梁諸元の入力画面

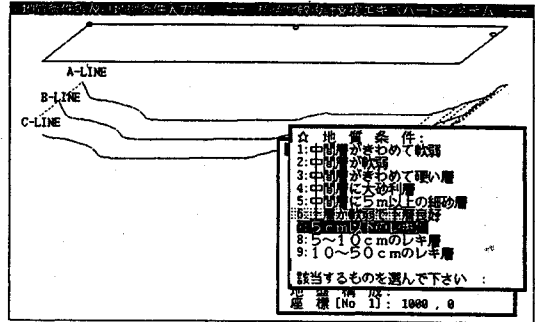
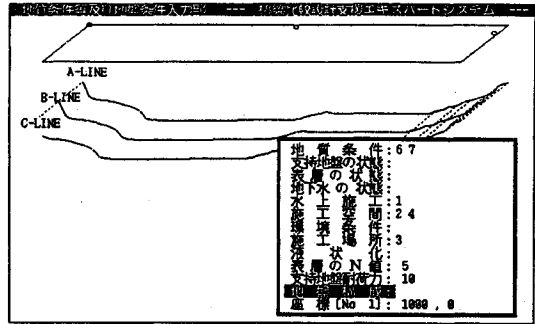


図-4 地質条件等入力サブサブシステムの入出力画面

- ① 径間長は5~80 m
- ② 径間数は1~5径間
- ③ 斜角は70°以上
- ④ 縦断形状は水平のみ
- ⑤ 直線橋のみ
- ⑥ 異橋種の組み合わせは認めない
- ⑦ 杭基礎は先端支持

(1) 上部工形式⁴⁾

対象とする上部工形式を表-1に示す^{5),6)}。なお、対象橋種は、昭和60年度都道府県事業報告書による、その年に架設された橋種の上位80%に含まれる橋種とした。

(2) 架設工法

対象とする架設工法を表-2に示す⁷⁾。

(3) 下部工形式（橋台、橋脚、基礎）

対象とする下部工形式を表-3に示す^{8),9)}。

4. サブシステム

ここでは本システムを構成するサブシステムについて説明をする。

(1) データ入力サブシステム

本サブシステムは、システムを運用していく上で必要な、橋梁諸元、河川諸元、地形、地質条件、地盤構成、架設工法選定条件等のデータの inputs を支援するシステムである。入出力画面の例を図-3~6に示しておく。

(2) 径間割り決定サブシステム¹⁰⁾

本サブシステムは、与えられた橋長、地形、河川流量等の条件に対して最適な径間割りを決定するシステムで

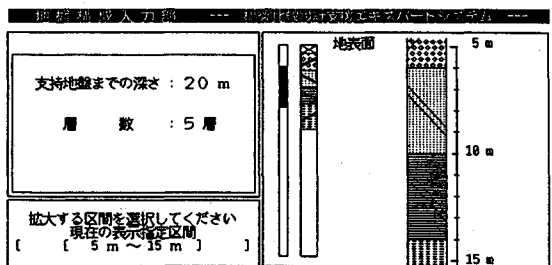
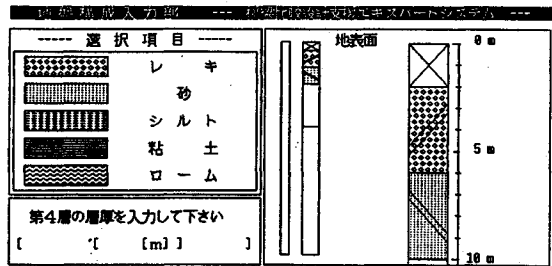


図-5 地盤構成入力サブサブシステムの入出力画面

ある。

まず、径間割り案を導出するに当たって、橋脚設置禁止区域を設定する。設定には河川管理施設等構造令、局所洗掘¹¹⁾等を考慮している。そして、橋脚設置禁止区域以外の区域（橋脚設置可能区域）に対して、

- ① 経済性を考慮して等径間を多く含む径間割りを行う。
- ② 等径間割りの状態からなるべく橋脚を移動しな

架設工法選定条件入力画面

経済的制限	[1.あり]
設置地域	[1.観光地 2.都市部 3.一般地]
架設入路の幅員[m]	[14 m]
河川内への仮橋設置	[1.可能 2.設置不可]
河川内への仮支柱(ベント)設置	[1.可能 2.設置不可]
架設時における桁下空間	[1.可能 2.使用不可]
架設作業帯上の障害物	[1.可能 2.防護・移動不可]
架設地点に近接した製作ヤード	[1.可能 2.設置不可]
橋台背面(橋梁延長上)の製作ヤード	[1.可能 2.設置不可]
ケーブル設備及びアンカーブロック	[1.可能 2.設置不可]
架設場所の巻掛対策	[1.なし 2.対策区分1 3.対策区分2]

架設工法選定条件入力プログラム マニュアル

項目の選択 : [↑][↓]
条件の選択 : [+][-]
数値入力 : [-] (+1) (-10) [0] (+10)
架設時 : [Prev] [Next]
架設作 : [Esc]
架設地 : [SPACE]
架設場所の巻掛対策	[1.なし 2.対策区分1 3.対策区分2]

図-6 架設工法選定条件入力サブシステムの出力画面

径間割り案導出部

No.	POS[m]	LEN[m]
A1	990	26
S1	---	33
P1	26	---
S2	---	26
A2	59	---

2 箇所 [m] [[HIT ANY KEY]]

図-7 径間割り案導出サブシステムの出力画面

い径間割りを行う。

③ 3径間以上に対しては黄金分割を考慮する。

という3点に重点をおいたアルゴリズムを構築し径間割り案を導出する(図-7参照)。

次に、導出案に対して経済性、景観性、保守性、上部工の施工性、下部工の施工性の5項目に対してファジィ評価¹²⁾を行い、それらを総合評価して最適案を決定する。その出力例が図-8である。ここで、rankとは、各評価項目に対する望ましきの段階のことで「悪い」「やや悪い」「ふつう」「やや良い」「良い」の5段階で表される。また、グラフにおける縦軸はグレード、横軸は前述のrankを表している。さらに、評価項目の施工性Aは上部工、施工性Bは下部工の施工性であり、各グラフの上にある()内の数値は、各評価項目の重みである。

2径間 第8案 径間長 30+29 (m)

	rank1	rank2	rank3	rank4	rank5
経済性	0.000	0.000	0.005	0.130	0.293
環境適合性	0.000	0.006	0.025	0.048	0.030
保守性	0.000	0.006	0.033	0.049	0.020
施工性A	0.000	0.006	0.033	0.049	0.020
施工性B	0.000	0.008	0.037	0.048	0.017
合計	0.000	0.027	0.132	0.324	0.379

第8案-1位
経済性(6/10) 景観性(1/10) 保守性(1/10)

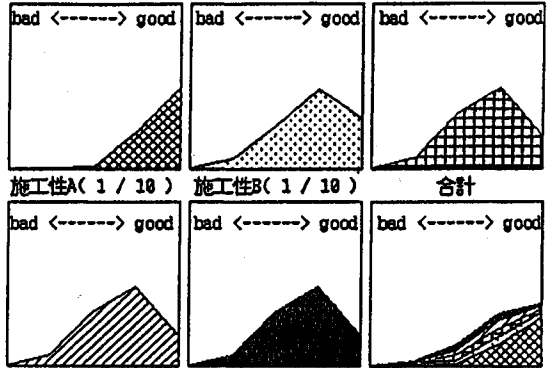


図-8 ファジィ評価の出力例

(3) 推論サブシステム

本サブシステムは、入力されたデータ及び決定された径間割りを基に推論を行い、上部工橋種及び架設工法の組み合わせの中から確信度の高いもの上位7案とその各案に対する下部工形式を選定するシステムである。

各選定は以下の項目に対して推論を行う。

- 上部工橋種：適用径間長，経済性，景観性，保守性，走行性，施工性，設置場所，塩害
- 架設工法：架設場所の条件，
- 橋台：適用高さ，施工性，上部工の死荷重反力
- 橋脚：適用高さ，施工性，設置場所
- 基礎：地質条件，地盤条件

(4) 評価サブシステム

本サブシステムは、推論サブシステムにおいて選出された上位7案の上下部工の組み合わせに対して経済性、景観性、施工性、保守性、走行性の5項目について評価を行うシステムである。

経済性は概算工費を求め、それを基に点数付けを行っている。景観性、施工性、保守性はあらかじめ橋種ごとに適合性を設定しておき、それをもとに点数付けを行っている(表-4参照)。また、走行性はジョイントの数で点数付けを行っている。

表一4 上部工および架設工法選定表

橋 種	架設工法	適用スパン(m)	景観	保守	施工
PG橋	単純合成単純桁 自造スレール(吊り)造出し	20~40	△	△	○
	単純合成連続桁 自造スレール(吊り)造出し	30~55	△	△	○
	単純合成I桁 自造スレール(吊り)造出し	25~55	△	△	△
	単純合成H桁 自造スレール(吊り)造出し	10~25	△	△	△
BG橋	単純合成箱桁 自造スレール(吊り)造出し	40~60	○	○	○
	単純非合成箱桁 自造スレール(吊り)造出し	35~55	○	○	○
	連続非合成箱桁 自造スレール(吊り)造出し	45~80	○	○	○
PC橋	プレテン単純I桁 スレーションガーダ	5~15	△	○	○
	プレテン中空床版 スレーションガーダ	10~20	△	○	○
	プレテン単純T桁 スレーションガーダ	10~20	△	○	○
	ボスアン単純T桁 スレーションガーダ	20~40	△	○	○
	単純箱桁 支保工式	20~40	○	○	△
	連続箱桁 支保工式 押し出し	30~60 40~80	○	○	△
	RC橋 中空床版 支保工式	10~20	○	○	○
トラス	単純トラス 自造スレール(吊り)トラス(吊り)	55~80	△	△	△
	連続トラス 自造スレール(吊り)造出し	60~80	△	△	△
アーチ	アーチ橋 自造スレール(吊り)ケーブル(ペント)	50~80	○	△	△

表一5 架設地域における評価項目の重みの参考値

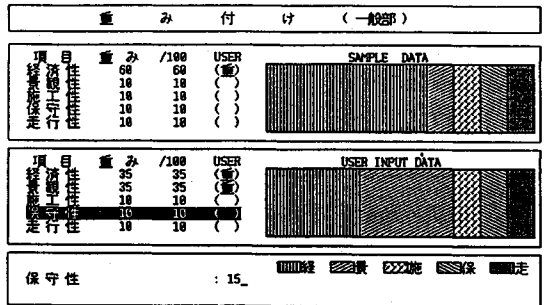
	経済性	景観性	施工性	保守性	走行性
観光地	35	35	10	10	10
都市部	50	20	10	10	10
一般部	60	10	10	10	10

5. 検 証

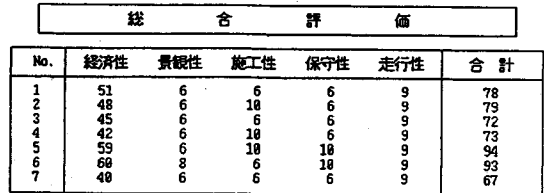
本システムの結果と実際に行われた比較設計とを比較して検証を行った。なお、ここでは表一6に示すK橋(橋長:59m, 2径間:31m+28m)のみを取り上げて比較検討した。

(1) 本システムによる結果

a) 径間割り決定サブシステムによる導出結果



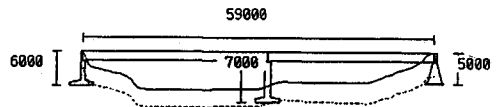
図一9 重み付けサブシステムの入出力画面



図一10 総合評価点数

第1案

2径間:単純箱桁(PC) 支保工式架設工法
橋長 59m スパン長 31+28m
橋台高 6m 橋高 6m 直接基礎
橋脚高 5m 橋脚基礎
逆工式橋脚(小中壁式) 橋脚高 7m 直接基礎
工費 12266万円
評価 . 93点



図一11 結果等表示サブシステムの表示

本サブシステムからは2径間:30m+29mという結果が得られた。他の導出案と合わせて表一7に示す。

b) 推論および評価サブシステムによる導出結果

本サブシステムによる結果を表一8に示す。ただし、形式選定を比較するために、径間割りは実際の比較設計と同じ31m+28mとして推論した。また、総合評価における経済性、景観性、保守性、施工性A、施工性Bの重みを6:1:1:1:1とした。

(2) 検 証

a) 径間割り決定サブシステムの検証

本サブシステムの結果と実際の径間割り(2径間:31m+28m)との差は1mとなっており、本サブシステムにはそれほど大きな問題はないと思われる。

b) 推論サブシステムおよび評価サブシステムの検証

K橋の実際の比較設計と本システムによる結果を、以下の視点から考察した。

① 形式

下部工を除けば、実際の比較設計の3案と同じ形式の

表-6 K橋の実際の比較設計

	形式	工費(万円)
第一案	単純合成I桁 自走クレーンによるベント工法	11080
	逆T式橋台 直接基礎	720
	逆T式橋台 直接基礎	1040
	小判壁式橋脚 直接基礎	1910
	計	14750
第二案	ボス単純T桁 テンションガーグ式架設工法	11800
	逆T式橋台 直接基礎	780
	逆T式橋台 直接基礎	1080
	小判壁式橋脚 直接基礎	1980
	計	15640
第三案	単純箱桁(PC) 支保工式架設工法	12580
	逆T式橋台 直接基礎	750
	逆T式橋台 直接基礎	1030
	小判壁式橋脚 直接基礎	1900
	計	16260

表-7 径間割り決定サブシステムによる導出結果

順位	案	径間割り案	rank
1	第8案	30m + 29m	4.2239
2	第7案	29m + 30m	4.2236
3	第5案	28m + 31m	4.2030
4	第4案	32m + 27m	4.1899
5	第6案	31m + 28m	4.1788
6	第2案	33m + 26m	4.1672
7	第1案	26m + 33m	4.1542
8	第3案	27m + 32m	4.1446

案が、本システムの上位5案以内にすべて入っており、推論サブシステムについては有効であると言えよう。なお、本システムにおいては、一方の橋台が重力式橋台となっており、実際の比較設計とは異なっているが、これは施工性、経済性等を考えれば重力式となるものを、実際の比較設計では左右のバランスを考えたため、逆T式橋台になったものと思われる。今後は、このような考え方もシステムに組み込む必要があるだろう。

② 工費

工費については、実際の比較設計と本システムの結果との間には10~25%の誤差があり、全体的に本システムの結果が少なく算出されている。この点に関しては、今後、概算工費を算出するサブシステムの調整が必要となるであろう。なお、本システムではあくまでも概算工費の算出を行っており、実際の工費と厳密に一致しなくても、相対的に一致していればよいと考えている。

表-8 推論および評価サブシステムによる導出結果

	形式	工費(万円)
第一案	単純箱桁(PC) 支保工式架設工法	9463
	逆T式橋台 直接基礎	727
	逆T式橋台 直接基礎	770
	重力式橋台 直接基礎	566
	小判壁式橋脚 直接基礎	740
計	12266	
第二案	ボス単純T桁(PC) ステンション架設工法	9754
	逆T式橋台 直接基礎	1240
	逆T式橋台 直接基礎	770
	重力式橋台 直接基礎	566
	小判壁式橋脚 直接基礎	740
計	13070	
第三案	ボス単純T桁(PC) ステンション架設工法	9754
	逆T式橋台 直接基礎	1418
	逆T式橋台 直接基礎	770
	重力式橋台 直接基礎	566
	小判壁式橋脚 直接基礎	740
計	13248	
第四案	非合成単純桁 自走クレーンによるベント工法	10750
	逆T式橋台 直接基礎	1096
	逆T式橋台 直接基礎	770
	重力式橋台 直接基礎	566
	小判壁式橋脚 直接基礎	740
計	13922	
第五案	単純合成I桁 自走クレーンによるベント工法	10238
	逆T式橋台 直接基礎	980
	逆T式橋台 直接基礎	770
	重力式橋台 直接基礎	566
	小判壁式橋脚 直接基礎	740
計	13294	
第六案	非合成単純桁 送出し工法	10750
	逆T式橋台 直接基礎	2364
	逆T式橋台 直接基礎	770
	重力式橋台 直接基礎	566
	小判壁式橋脚 直接基礎	740
計	15190	
第七案	非合成単純桁 ケーブルクレーンによる吊工法	10750
	逆T式橋台 直接基礎	3299
	逆T式橋台 直接基礎	770
	重力式橋台 直接基礎	566
	小判壁式橋脚 直接基礎	740
計	16125	

③ 順位

実際の比較設計と本システムの結果を比較すると、実際の比較設計の第1案が本システム結果の第5案、実際の比較設計の第2案が本システム結果の第3案、そして第3案が第1案となっている。

今回の検証では、評価サブシステムにおける経済性、景観性、保守性、施工性A、施工性Bの重みを6:1:1:1:1として評価しており、経済性の占める割合が高くなっている。②で述べたように、工費の算出に若干の調整が必要であるため、本サブシステムの善し悪しは厳密には判断できないが、重み付けを変更させることによって順位の調整は可能なことから、特に問題はないと思われる。

部分的には、まだいくつかの問題は残しているものの、今回はあくまで橋梁全体の比較設計をシステム化することを主眼においており、今後、各評価要素のバージョン

アップ、特に景観性にフラクタルを取り込むこと等を検討しており、総合評価の動的計画の導入とともに、近く発表の予定である。

6. おわりに

本研究は、土木設計の中の橋梁の比較設計段階を対象に、複数の評価要素を組み込んだエキスパートシステムの構築を試み、過去に実施された比較設計と比較することによって本システムの有効性を検証した。しかし、①上・下部橋種及び架設工法の拡張、②橋長決定の付加、③費用積算をはじめ評価要素のグレードアップ等の課題が残されていることも事実である。

土木工学の分野は、多くの工学分野の中でもエキスパートシステムが最も有効に利用できる可能性を秘めていると考えられている。勿論その実現は容易ではないが、今後、知識処理技術によって広がった計算機利用の限界をどこまで拡大できるかという、より現実的な問題に挑戦していかなければならないであろう。これからも実際にシステムを構築、開発しながら方向性を探っていくことが重要で、実用化のためには各々の段階に応じた地道な努力が肝要であろう。その意味では、本研究も土木設計分野の実用比較設計支援エキスパートシステム開発へのモチベーションを与えた段階なのかも知れない。

参考文献

1) 岩松幸雄：土木設計論，土木研究所資料第1261号，1977

年3月。

- 2) 岩松幸雄・須原茂・黒沼秀友：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，土木学会第43回年次学術講演概要集，pp.18～19，1988年。
- 3) 岩松幸雄・須原茂：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，建設マネジメント問題に関する研究発表，討論会，講演集，pp.107～114，1988年1月。
- 4) Leelawat, C., Kuribayashi, E. and Niuro, T. : Expert System for Selection of Bridge Superstructure, Proceedings of The 43th Annual Conference of The JSCE, Vol.1, pp.516～517, Oct., 1988.
- 5) 加藤正晴・柿崎博雄：新体系土木工学41，橋梁上部構造（I）—鋼橋—，技報堂，1980年。
- 6) 西山啓伸：新体系土木工学43，橋梁上部構造（III）—コンクリート橋—，技報堂，1980年。
- 7) 山寺徳明：架設工法の種類と選定，橋梁と基礎，pp.19～29，1982年8月。
- 8) 青木重雄・和田克哉・青木一二三：新体系土木工学44，橋梁下部構造，技報堂，1985年。
- 9) 日本鋼構造協会：鋼橋計画マニュアル，1985年3月。
- 10) 大場清貴・岩松幸雄・黒沼秀友：橋梁比較設計支援エキスパートシステムにおける径間割り自動決定に関する研究，土木学会第45回年次学術講演概要集，pp.346～347，1990年。
- 11) 宇民正：橋脚周辺部における流れのパターンについて，京大防災研究所年報第12号B，1969年3月。
- 12) 水本雅晴：ファジィ理論とその応用，サイエンス社，1988年

(1991.7.31 受付)

A STUDY ON EXPERT SYSTEM FOR SELECTION OF BRIDGE

Sachio IWAMATSU, Yuuji HAYAKAWA and Takao HARADA

In recent years, the computerizing in civil engineering had been applied not only in CAD but also in Expert System. But, they did not need a synthetic knowledges and experience of a designer such as comparative design which is judged a whole bridge by plural elements, and deviated from primary mean of Expert System or Artificial Intelligence. In this paper, we picked up superstructure, substructure, and fundamental structure of bridge as the object of this study, and proposed Expert System which introduced plural estimated elements which economics, workability, adaptability to environment and so on. And the efficiency of the proposed system is demonstrated by the comparison between the result of this system and the past actual example of comparative.