

橋梁形式選定エキスパートシステムにおける橋上走行時の運転者の感覚評価に関する研究

STUDY ON THE EVALUATION OF DRIVER'S SENSE AT RUNNING
WITH RESPECT TO AN EXPERT SYSTEM FOR BRIDGE TYPE SELECTION

西土 隆幸* 前田 研一** 島田 清明*** 野村 国勝****

By Takayuki NISHIDO, Ken-ichi MAEDA Kiyooki SHIMADA and Kunikatsu NOMURA

The most suitable bridge type of superstructure and substructure is selected by an expert designer taking consideration of the comfort of drivers at running on a bridge, etc. Recently, the comfort of a driver is especially given attention. Therefore, the authors propose a method to evaluate the sense that the driver receives at running on a bridge. To evaluate it, the authors consider not only numbers of expansion joint, but also obstruction to view and vibration caused by girder stiffness. But the evaluation of these elements is difficult, because the obstruction to view and the vibration are ambiguous. The authors, therefore, utilize fuzzy sets theory. As a result, it has become to quantitatively evaluate them by using the present method.

1. まえがき

橋梁の上下部工形式は、関係する適用法規を満足するのはもちろんであるが、経済性のみでなく、施工性、走行性、保守性、美観なども検討¹⁾し、熟練設計者の総合的な評価によって最適なものを選定される。著者らは、熟練設計者の知識、関係法令あるいは、数種のマニュアルをデータベースに取り入れ、河川橋梁を対象にした上下部工形式選定エキスパートシステムを開発した²⁾。本システムでは、主に経済性に重点を置き、正確に算出される上下部工費を用いて、総工費の安価なものから順位付けが行われる。そして、走行性（橋上走行時の運転者の快適性の程度）と保守性は、参考程度に評価されている。

最近では、社会資本に対する地元住民、あるいは利用者の認識が高まっており、橋梁についてもその機能を満たすだけでなく、美観や走行性の向上も強く求められている。特に、ジョイント通過時に運転者が受ける振動あるいは騒音や、橋梁が持つ走行中の振動特性と視界とについては、それらの改善が強く望まれている。そのようなことから、橋梁の形式選定における走行性は、重要な項目と考えられる。

既存のエキスパートシステムでは、著者らのシステムを含め、総合評価の項目の中の走行性については、ジョイント（の箇所）数のみの評価^{3), 4)}が行われているが、この評価のみでは不十分な場合もある、そこで、鋼橋を対象に、新たに本システムに橋上走行時の桁の振動特性（桁の剛性）と視界の評価を加えること

* 工修 川田工業(株)技術本部中央研究室 (〒114 東京都北区西ヶ原 3-45-4)

** 工博 川田工業(株)技術本部中央研究室長 (〒114 東京都北区西ヶ原 3-45-4)

*** 川田工業(株)技術本部技術部設計2課 (〒114 東京都北区西ヶ原 3-45-4)

**** 工修 川田工業(株)技術本部長 (〒114 東京都北区西ヶ原 3-45-4)

にした。しかし、振動特性と視界とは、運転者それぞれの受ける感覚が異なり、定量的な評価が非常に困難である。そのため、それらの評価をファジィ理論を用いて行うことにした。さらに、ジョイント、振動特性および視界が走行性に与える影響の比率、すなわち、重みは、橋梁を利用する運転者と橋梁形式を決定する熟練設計者とは異なると思われる。そこで、両者の立場から決定されたこれらの要素の重みを走行性の評価に適用した。

本文は、橋梁形式選定における橋上走行時の運転者の感覚評価に関して、その評価方法の提案、および実際の比較設計への適用により、その妥当性を検証した結果について述べるものである。

なお、本システムの開発環境としてワークステーション（KS-303 日本ユニシス）とエキスパートシェル（KEE インテリコープ社 LISP言語）を用いた。

2. 対象要素とその評価方法

橋上走行時の運転者に最も大きな影響を与えるのは、ジョイント通過時の振動あるいは騒音である。しかし、快適な運転を行うためには、走行時における桁の振動と視界も無視できない要素である。これらの要素は、橋種のみでなく、橋長によっても大きく変化する。そこで、鋼橋を対象にし、これら3つの要素を考慮して走行性の評価を行うことにする。

（1） ジョイントの評価

ジョイントの評価は、選定された上部工形式のジョイント数を対象にして行われる。すなわち、それらは相対的に評価される。そこで、選定されたすべての上部工形式のジョイント数を調べ、ジョイント数の最少のものが最も走行性は良くなることから5点を、最多のものが最も悪くなることから1点をつけることにする。そして、両者の間となるジョイント数を持つ上部工形式は、比例配分して点数づける。

（2） 振動特性の評価

橋上走行時の桁の振動は、運転者に不安感を与える。しかし、不安感の程度には個人差があり、また、漠然としていることから、ジョイントの評価のような明確な点数づけは困難である。そこで、ファジィ理論⁹⁾を用い、以下の方法で定量的に評価することにした。

振動特性の評価には、橋種と橋長を考慮する必要がある。そこで、これらを考慮したメンバーシップ関数を作成することにした。

橋梁を利用する運転者と橋梁形式を決定する熟練設計者とは、桁の振動に対する不安感の程度は、異なると思われる。例えば、走行中に揺れやすいという橋梁を考えれば、橋梁の設計に関して、ほとんど知識を持たない運転者は、橋上走行中に大きな不安感を抱き、なぜ、頑丈な橋梁にしないのかと疑問を持つであろう。一方、熟練設計者は、その揺れ（変位）は、示方書に規定された値を満足するであろうから、この程度の揺れは仕方ないと考えるであろう。

以上のように、両者の不安感の程度には違いがあるが、それらを定量的に評価した場合には、どれだけの違いがあるのかを明確にしなければならない。もし、両者の評価結果に大きな違いがあれば、運転者が走行性の評価を行うべきであろう。

そのようなことから、運転者と熟練設計者とが振動特性を評価するメンバーシップ関数を作成すべきである。しかし、橋梁の知識を持たない運転者には、たとえ主観的にせよ、各々の橋種に対する振動特性を整合性を持たせて評価することは、非常に困難である。そこで、今回、これらのメンバーシップ関数を、熟練設計者のみにより作成することにする。しかし、各要素が走行性に与える影響は運転者が決定できることから、後述するように、両者が各要素の重みづけを行うことにする。

振動特性を評価するメンバーシップ関数を図-1～7の上段に示す。これらは、すべて一人の上部工熟練

設計者により作成されたものである。単純合成Ⅰ桁を例にとると、このメンバーシップ関数は、図－１のようになる。すなわち、振動特性のメンバーシップ関数を径間長が”小さい”，”普通”そして，”大きい”の各項目に対して作成する。例えば，径間長が”普通”のときの振動特性は，最も悪いとき，あるいは，運転者が最も不安を感じるときを１点，そして，最も良いときを５点とすると，２点となる確からしさが最も高いことを表している。

同様に，径間長が”小さい”，”普通”そして，”大きい”という概念もメンバーシップ関数で表した（図－１下段）。例えば，径間長が”普通”という概念は，径間長が30m～50mのときに最も確かなることを表している。

以上の方法で他の形式の振動特性も評価した。ここで，一人の上部工熟練設計者がすべてのメンバーシップ関数を作成したのは，もちろん主観的な評価ではあるが，複数の熟練設計者の作成したメンバーシップ関数を平均するよりも，各々の形式に対して，より整合性を持たせた評価が行えると考えたからである。しかし，整合性を持たせるためとはいえ，一人の熟練設計者のみににより，それらの関数を決定することは危険である。そこで，これらのメンバーシップ関数を作成した後に，再度，複数の上部工熟練設計者がこれらを検討し，微調整を行った。

（３）視界の評価

橋上走行時の視界は，運転のしやすさに影響する。視界の評価も，ジョイントの評価のような明確な点数づけが困難なことから，ファジ理論を用いた。視界を評価するメンバーシップ関数も振動特性と同じ考え方を用いて作成した。それらを図－１～７の中段に示す。

（４）メンバーシップ関数の作成方法

ここでは，図－１～７のメンバーシップ関数の作成方法を，数種の橋梁形式を例にとり以下に述べる。なお，図－８は，これらの関数の作成方法を説明するために，図－２，３，４および５から，それぞれ１つの橋梁形式を抜き出し，それらを１つの図にまとめたものである。

振動特性の評価は，橋梁のたわみ剛性や固有振動数などの影響を受ける。後者については，個々の形式により，その値の違いが大きく，それらを比較するためには厳密な数値計算を必要とする。そのため，ここでは，剛性の一般的な概念より評価することにした。

図－１は，単純形式の桁橋のメンバーシップ関数である。径間長が小さい場合には，単純合成Ⅱ桁と単純合成Ⅰ桁では，後者の方が剛性が低く，たわみやすい。しかも，適用できる径間長の幅が長いことから，前者より振動特性の評価に幅を持たせている。さらに，単純合成箱桁は，単純合成Ⅱ桁と単純合成Ⅰ桁に比して，剛性がより高いため，それらより評価を１ランク上げている。径間長に比例し３形式とも剛性が低下するので，径間長が大きくなるに従い，それらの評価を１ランクずつ下げている。視界の評価については，３形式とも上路式であるため，視界の妨げとなるものが無く，すべて良とした。

図－２は，単純形式と連続形式の桁橋のメンバーシップ関数である。径間長に比例し，単純非合成Ⅰ桁，連続非合成Ⅰ桁ともに振動特性の評価は下がるが，後者は，支間割の影響で前者よりたわみが小さくなることを考慮して，その評価に幅を持たせている。視界の評価については，図－１と同じ理由で，３形式とも良とした。

図－８は，桁橋とそれ以外の形式とのメンバーシップ関数である。単純非合成箱桁は単純非合成Ⅰ桁に比し，より剛性が高く，単純下路トラスと下路アーチは，それらよりさらに剛性が高い。また，単純下路トラスの方が下路アーチより適用できる径間長の幅が短いことから，前者の振動特性の評価を最も高くした。視界の評価については，単純非合成Ⅰ桁，単純非合成箱桁は共に上路式であり，視界が妨げられず良とした。一方，吊材により，単純下路トラスは連続的に，下路アーチは不連続的に視界が妨げられるため，その違い

単純合成H桁 ——— 単純合成I桁 - - - - 単純合成箱桁 ———

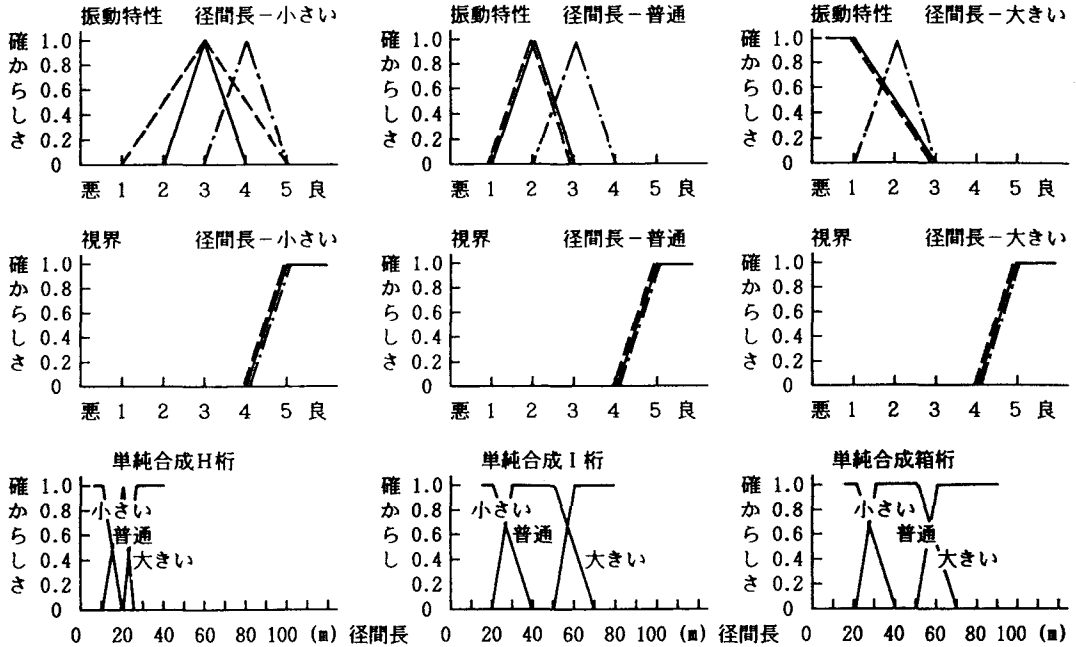


図-1 メンバシップ関数 (単純合成H桁, 単純合成I桁, 単純合成箱桁)

単純非合成I桁 ——— 連続非合成I桁 - - - -

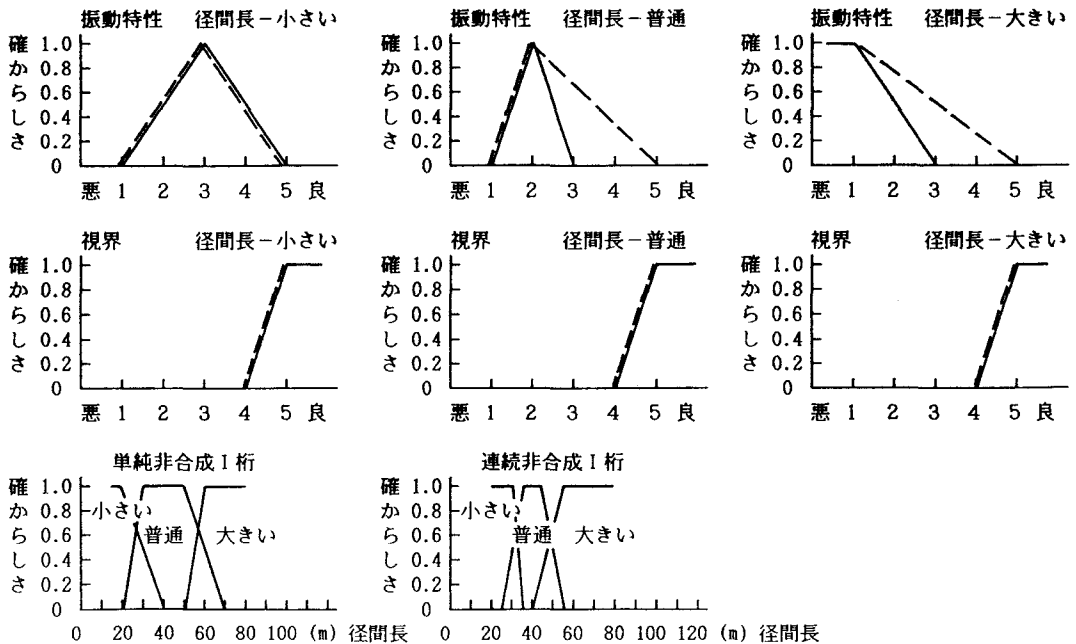


図-2 メンバシップ関数 (単純非合成I桁, 連続非合成I桁)

単純非合成箱桁 ————— 連続非合成箱桁 - - - - -

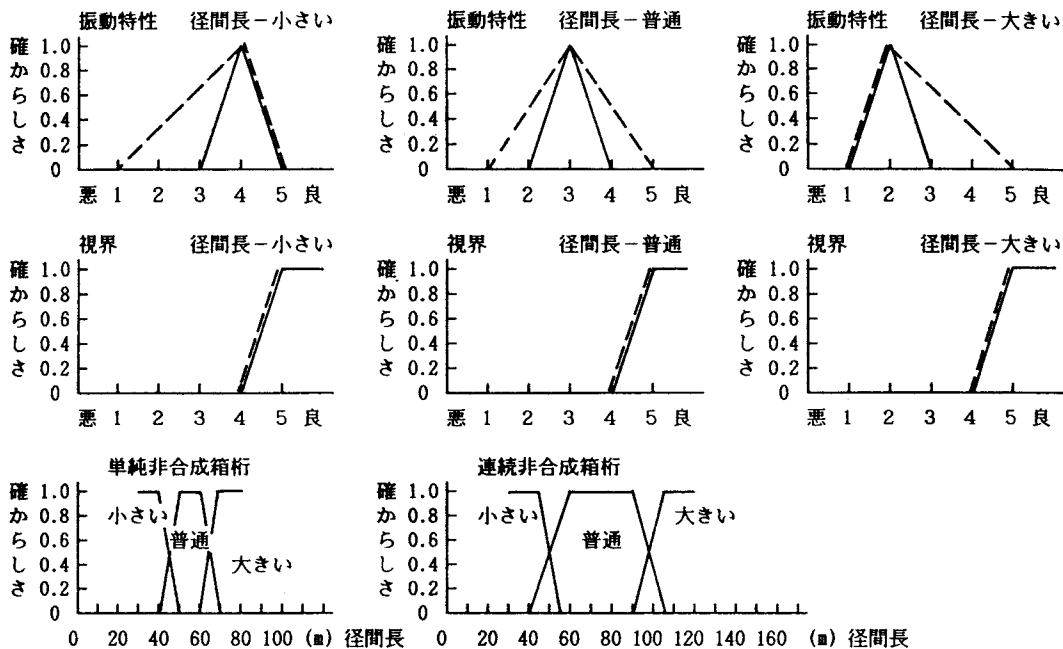


図-3 メンバシップ関数 (単純非合成箱桁, 連続非合成箱桁)

単純下路トラス ————— 連続下路トラス - - - - -

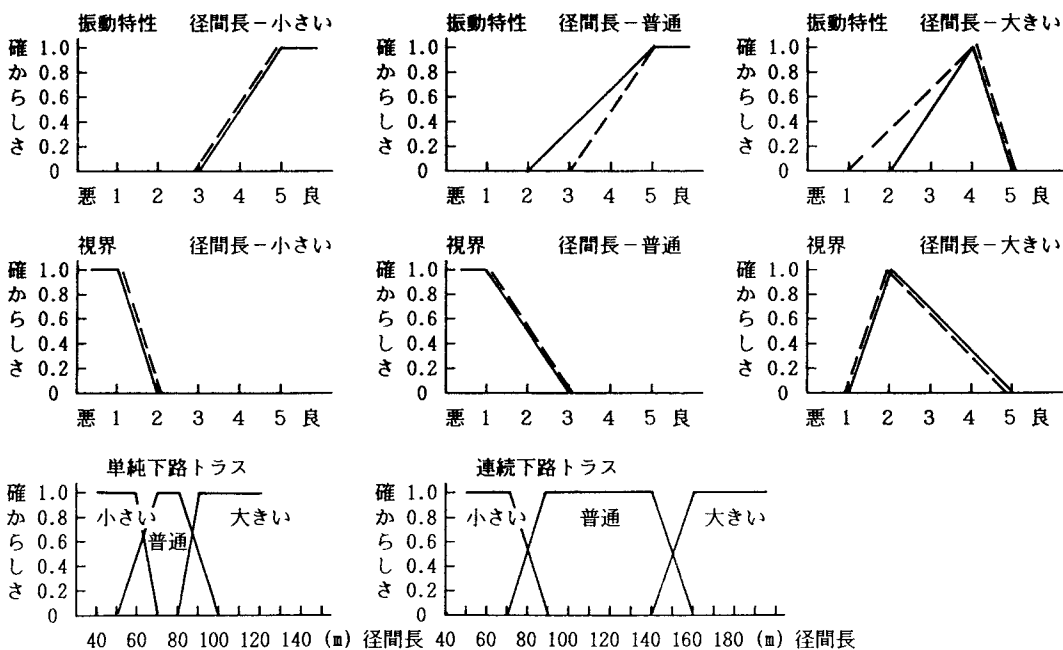


図-4 メンバシップ関数 (単純下路トラス, 連続下路トラス)

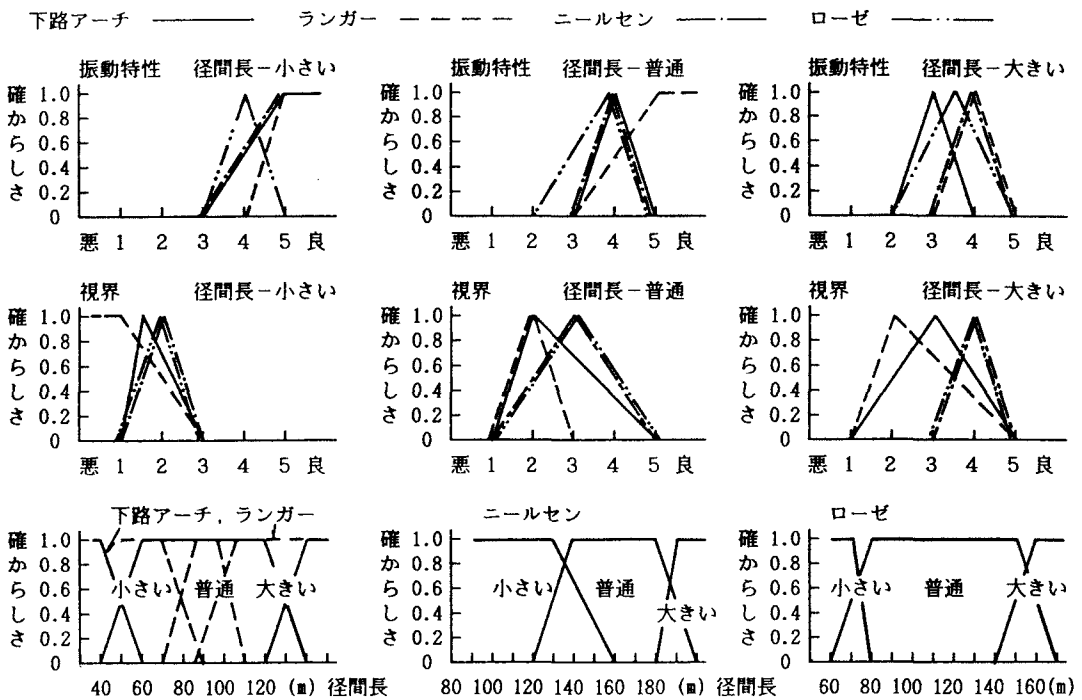


図-5 メンバシップ関数 (下路アーチ, ランガー, ニールセン, ローゼ)

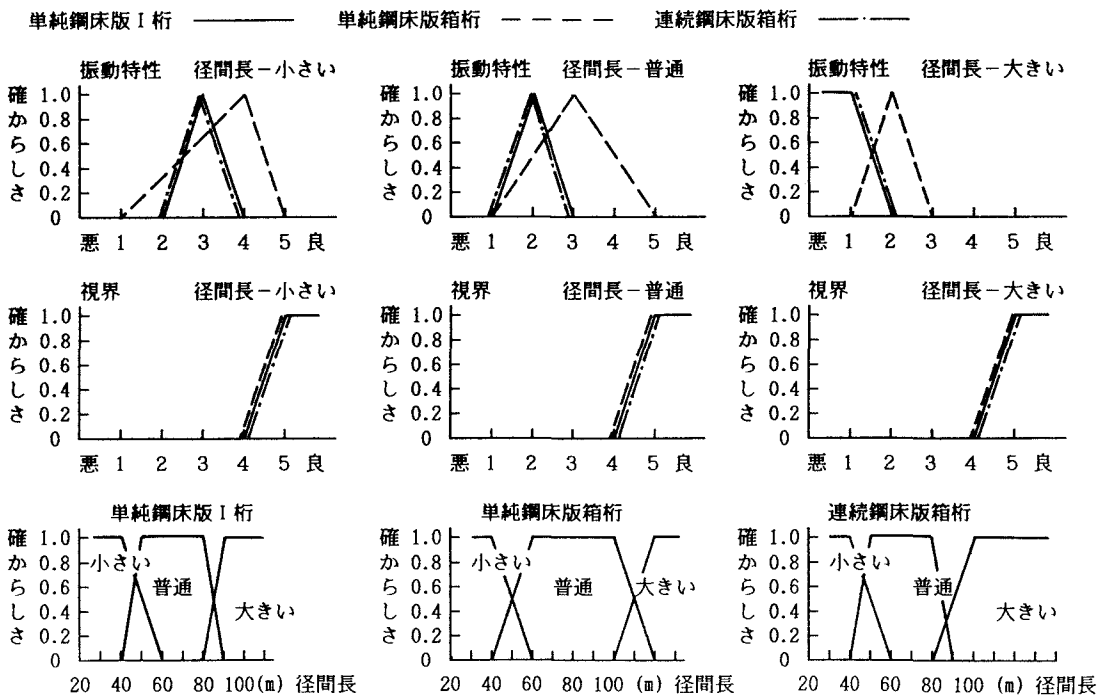


図-6 メンバシップ関数 (単純鋼床版I桁, 単純鋼床版箱桁, 連続鋼床版箱桁)

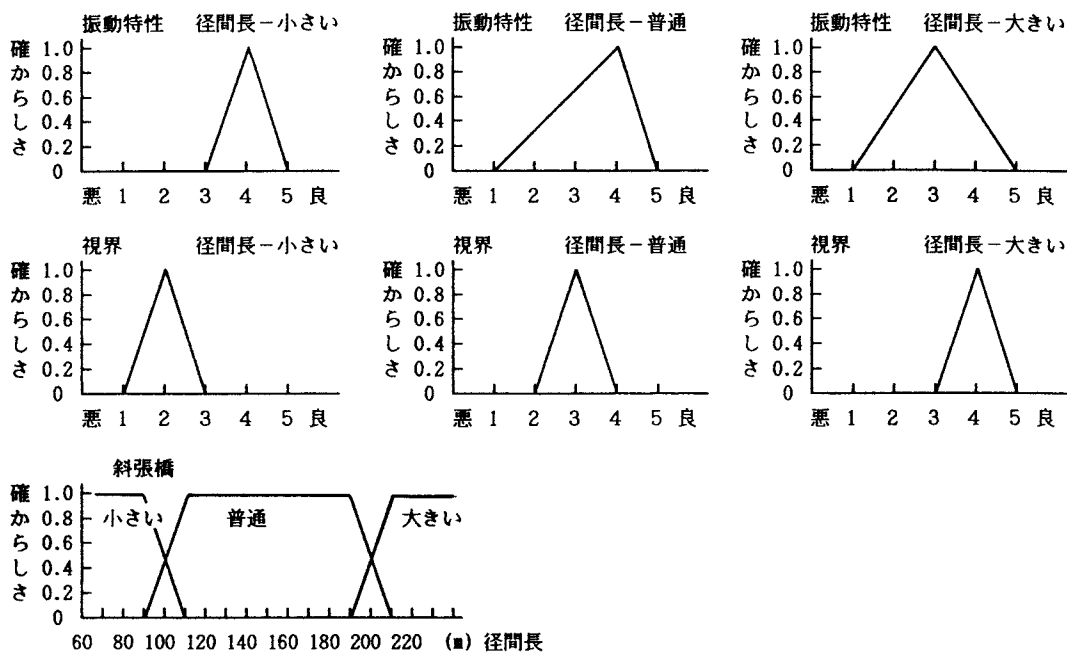


図-7 メンバーシップ関数 (斜張橋)

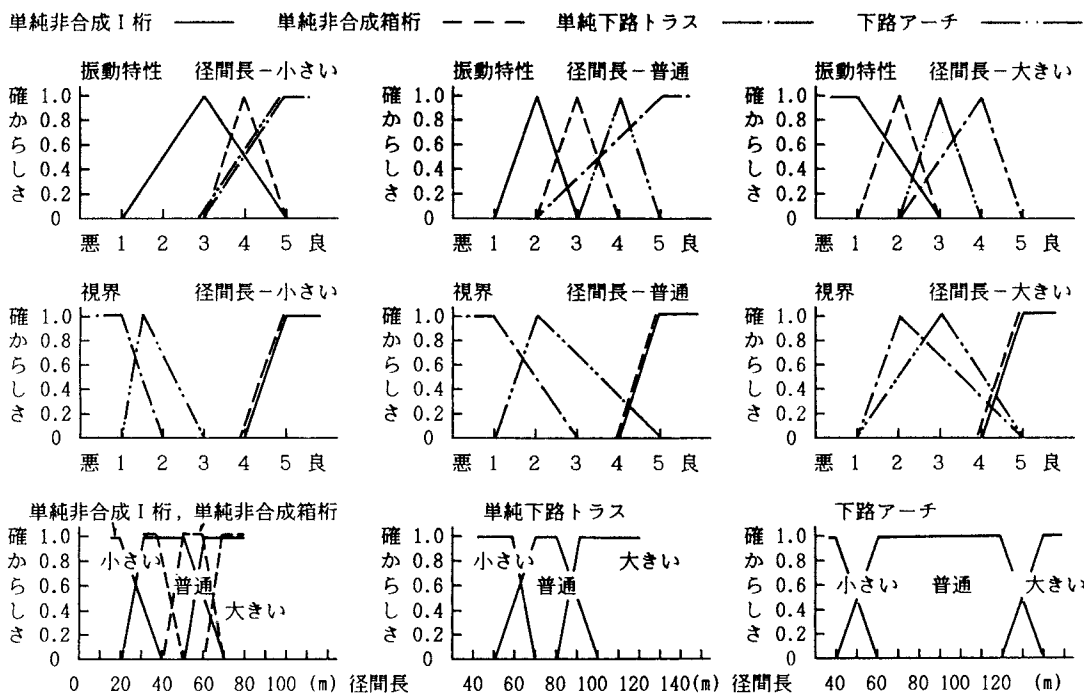


図-8 メンバーシップ関数の説明

を評価した。また、径間長に比例し、両者とも吊材間隔が広がるが、両者の径間長の差を考慮して評価した。

3. 重みづけとメンバーシップ関数の変更

(1) 各要素の重みづけ

ジョイント、振動特性および視界それぞれが走行性に与える影響、すなわち、各要素の重みは、前章で述べたように運転者と熟練設計者とは異なると思われる。そこで、以下の方法で両者の立場から各要素の重みを決定し、それらを走行性の総合評価に適用する。

まず、運転者による各要素の重みは、17名の運転者に図-9の様式のアンケートを実施し、各要素の評価結果を算術平均することにより求めた。この際、運転者によっては、図-9に示すように、必ずしも各要素のうちのどれか1つを10点とはしない場合もあった。また、17名全員が「ジョイントを通過するときの振動あるいは騒音」を最高得点(図-9では6点)としていた。そこで、全員のアンケートに対して、この要素を10点とするように各要素を再度得点し直した。そして、全員のアンケートの算術平均結果を、さらに10で除することにより正規化した。その結果、ジョイントの重み:1.0、振動特性の重み:0.34、視界の重み:0.44と決定した。

あなたは、橋梁上を車で通過するとき、次のどの項目が最も気(不快)になりますか。

	アンケート例
1. ジョイントを通過するときの振動あるいは、騒音	6
2. 視界あるいは、橋梁が与える圧迫感	2
3. 橋梁の揺れ(振動)………ジョイント以外	4

最も気(不快)になる。……………10点
まったく気(不快)にならない。……………0点

を基準にして点数をつけて下さい。

図-9 アンケート様式

一方、熟練設計者の重みは、ジョイントを1.0としたときに他の要素がいくらかになるかを定めることにした。その結果、ジョイントの重み:1.0、振動特性の重み:0.30、視界の重み:0.50と決定した。なお、重みづけは、メンバーシップ関数の作成者と同一の熟練設計者により行われた。

このように両者の決定した重みには、差異があることが分かった。これは、ここでは示していないが、運転者のアンケート結果には、かなりのばらつきがあり、それらを平均したことが原因である。そこで、次章では、それらの違いが走行性の評価にどの程度影響を与えるかを検討する。

(2) メンバーシップ関数の変更

図-1～7のメンバーシップ関数を実際に何度か使用している間には、さらに適切な評価をするために、これらを変更する必要性も生じる。

本システムでは、これらのメンバーシップ関数は、すべて知識ベースの中に格納されている。しかし、知識ベースの変更は、使用しているエキスパートシェルを熟知する必要があり、利用者（設計者）には困難である。結局、それらの変更は、現時点では、開発者が行わなければならない、エキスパートシステムの持つ大きな問題点となっている。

そこで、本システムでは、利用者がメンバーシップ関数を変更できるようにした。すなわち、これらの関数は、図－１を例にとれば、すべて直線の集まりなので、直線の勾配が変わるとにその両端の座標（径間長のメンバーシップ関数なら、X軸：径間長、Y軸：確からしき）を利用者が入力できるようにした。

４．比較設計例への適用結果とその考察

実際の比較設計における走行性の評価に、前章で述べたメンバーシップ関数を適用することにより、本方法の妥当性を検討する。走行性の評価に用いた比較設計例を図－１０に示す。この設計例は、熟練設計者により既に走行性の順位づけが行われているが、各走行性の評価の差が明確とはなっていない。例えば、CASE No.①と④の形式に対する走行性は、どちらがよりすぐれているか決定できず、ともに同順位となっている。

（１）計算方法

図－１１の斜張橋の場合を例にとると、振動特性と視界の評価方法は、以下のようになる。

- ① 斜張橋の径間長の平均値（125m）に対するメンバーシップ関数（平均値の±20%の幅を持たせる）を径間長のメンバーシップ関数に重ね、径間長が“小さい”、“普通”そして、“大きい”のメンバーシップ関数との交点を求める。その結果、径間長が“小さい”と“普通”との交点は、それぞれ0.23、1.0となる。
- ② 径間長が“小さい”場合の振動特性と視界とのメンバーシップ関数を0.23でカットする。すなわち、これらのメンバーシップ関数は、どのような場合でも0.23以下の確からしきしか持たないことを意味している。同様に、径間長が“大きい”場合の振動特性と視界とのメンバーシップ関数は、1.0でカットされることになるが、この場合には、元のメンバーシップ関数をそのまま使うことを意味する。
- ③ ①、②で得られた各径間長に対する振動特性と視界とのメンバーシップ関数を重ね合わせ、それらの図形の重心位置から真下に下ろした直線と横軸との交点が、各要素の最終的な評価となる。この場合には、それぞれ3.30、2.75となる。
- ④ 各要素の最終的な評価に重みを乗じて、それらを加算したものを斜張橋の走行性の評価とする。なお、各要素の中でジョイントの評価は確定量であるが、振動特性と視界との評価は、ともに定量的なものであってもあいまいさを含んでいる。すなわち、前者と後者は性質が異なるものであり、それらを単純に加算することは、必ずしも妥当とはいえない。これらの要素を完全に同等に取り扱うためには、何らかの操作が必要であり、その方法は、今後の課題である。

以上は、斜張橋の径間長の平均値を用いる場合であるが、それぞれの径間長（95m、155m）ごとに①～③を繰り返して最終評価の平均値を取る方法も考えられる。この場合の各径間長のメンバーシップ関数は、あいまいさを含んでおらず、正確な値となるので、図－１１に示すように、１本の直線として表される。なお、径間長の平均値とそれぞれの径間長の値が同じときも、あいまいさを含んでいないので１本の直線として表すことにした。

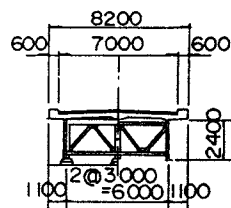
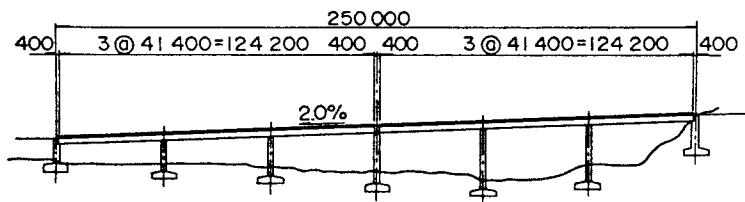
（２）評価結果と考察

表－１に評価結果の一覧表を示す。この表では、径間長に対して、平均値とそのものの値との両方、および重みに対して、複数の運転者の決定した値の平均値と熟練設計者の決定した値との両方を使って振動特性と視界とを評価している。これらの結果より以下のことが考察できる。

CASE No.

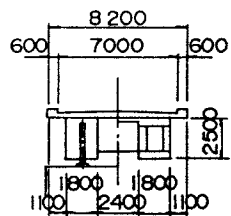
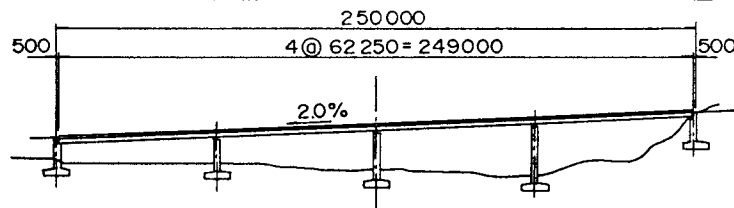
① 3径間連続非合成I桁×2連

走行性 4位



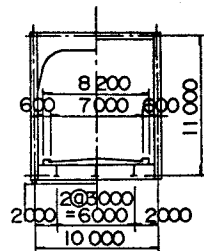
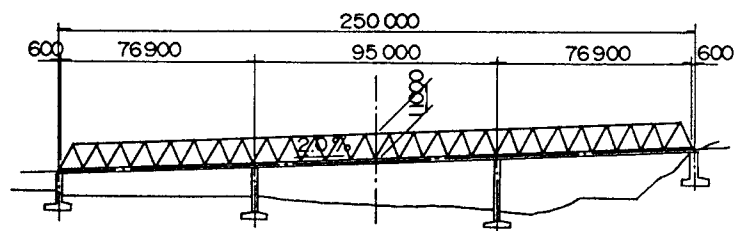
② 4径間連続非合成I桁

走行性 1位



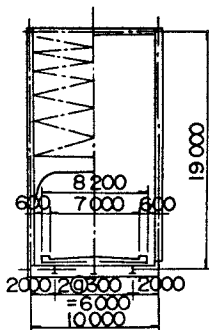
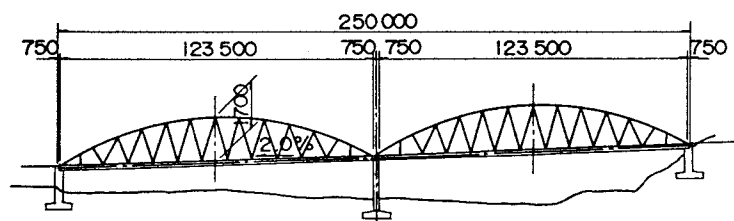
③ 3径間連続トラス

走行性 3位



④ 単径間ランガー×2連

走行性 4位



⑤ 2径間連続斜張橋

走行性 2位

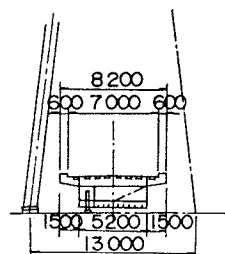
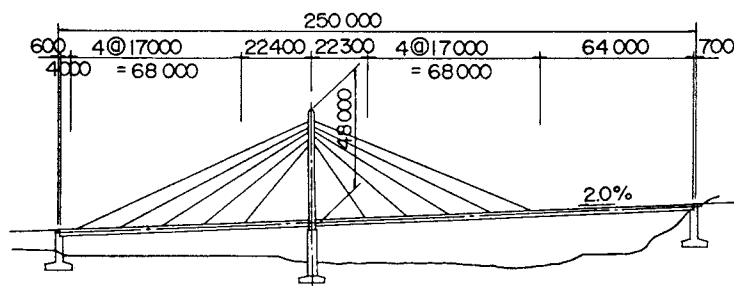


図-10 走行性の評価に用いた比較設計例

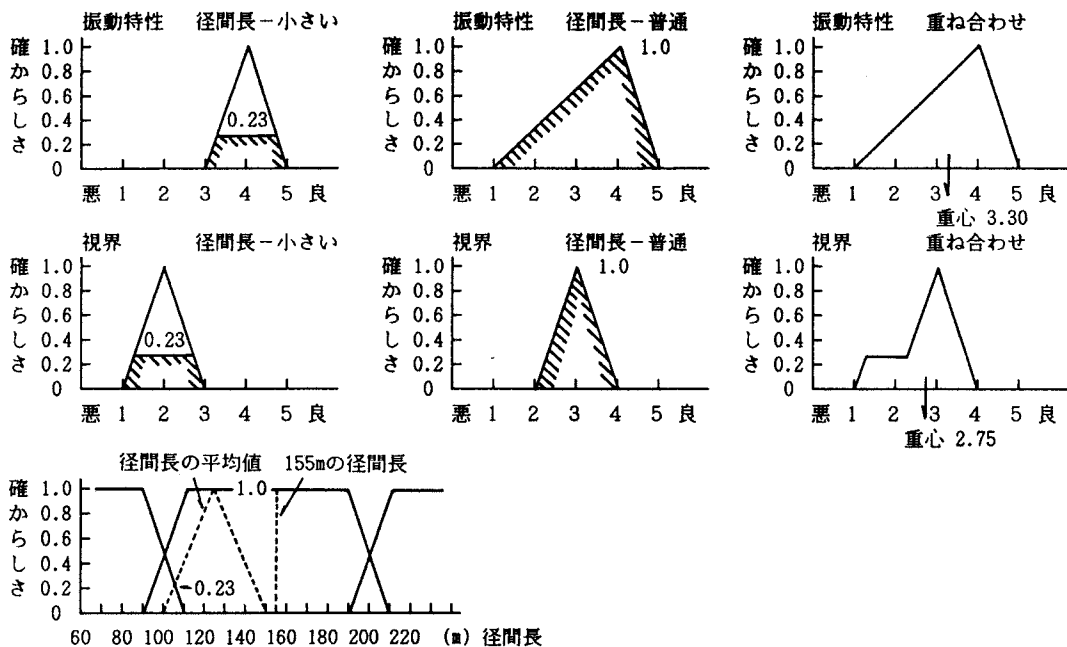


図- 1 1 斜張橋の場合の評価方法

表- 1 走行性評価結果一覧表

CASE No.	評価項目	ジョイント	振動特性	視界	走行性評価		提案した方法 法による 順位	熟練設計者 による 順位
					熟練設計者	運転者の平均値		
①	方法 1	1.00	2.63	4.65	4.11	3.94	4	4
	方法 2	1.00	2.63	4.65	4.11	3.94	4	
②	方法 1	5.00	3.00	4.65	8.23	8.07	1	1
	方法 2	5.00	3.00	4.65	8.23	8.07	1	
③	方法 1	5.00	4.70	1.30	7.06	7.17	3	3
	方法 2	5.00	4.41	1.60	7.12	7.20	3	
④	方法 1	1.00	4.00	2.70	3.55	3.55	5	4
	方法 2	1.00	4.00	2.70	3.55	3.55	5	
⑤	方法 1	5.00	3.30	2.75	7.37	7.33	2	2
	方法 2	5.00	3.34	2.63	7.34	7.31	2	
重み	練設計者	1.00	0.30	0.50				
	運転者の平均	1.00	0.34	0.44				

方法 1 : 径間長の平均値に対するメンバーシップ関数を用いる
 方法 2 : 各径間長そのものに対するメンバーシップ関数を用いる。

今回提案した方法と、比較設計例における走行性の評価結果の順位は、1～3位までは一致した。比較設計例では、4位となるものが2つあるが、本方法では、定量的な評価ができることから両者の差も明確となっている。

運転者と熟練設計者の主観では、走行性に対する不安感の程度に違いがあるが、重みづけを行って定量的にそれらを表現すると、両者は最大で約4%の差となった。この例では、径間長および重みにどの方法を用いても、走行性の順序は逆転しないが、走行性の評価を行う橋梁形式が多い場合には、それらの評価結果が逆転することもあり得る。

径間長の平均値を用いる場合と径間長そのものの値を用いる場合との走行性の評価では、両者の差はほとんどない。このことから振動特性と視界との評価には、計算量が少なくて済む径間長の平均値を用いればよいことが分かった。

橋梁形式は、経済性、施工性、走行性、保守性および美観などの項目を総合的に評価して最終的に選定される。すなわち、走行性の最も良いものが、必ずしも最終的に選定される橋梁形式とは限らない。そこで、各橋梁形式の走行性を定量的に評価することは、重要なことと思われる。

5. 結 論

これまで述べてきたことから、以下のことがいえる。

- (1) 振動特性と視界との評価にファジィ理論を用いることにより、ジョイントとそれらを考慮した走行性の定量的な評価が可能となった。
- (2) 今回提案した方法による走行性の評価結果と熟練設計者によって行われた比較設計における走行性の評価結果との順位は、ほぼ一致し、本方法が妥当であることが分かった。
- (3) ジョイント、振動特性および視界それぞれの重みは、複数の運転者が決定した値の平均値と熟練設計者が決定した値とは異なり、走行性の評価にも影響する。走行性の評価を行う橋梁形式が多い場合には、両者の評価結果が逆転することもあると考えられる。
- (4) 走行性の評価を行う場合には、その上部工形式の径間長の平均値を用いる方法と、径間長それぞれの値を用いて得られた最終評価を平均する方法とがある。それらの結果は、ほとんど差がないことから、計算量が少なくて済む径間長の平均値を用いればよい。

参考文献

- 1) 日本橋梁建設協会：鋼橋の計画，1988年10月。
- 2) 西土隆幸，前田研一，野村国勝：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。
- 3) 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，建設省土木研究所，橋梁形式選定エキスパートシステムに関するミニワークショップ，1989年1月。
- 4) 土木設計エキスパート・システム研究会：報告書，1986年10月。
- 5) 田崎栄一郎：ファジィ・エキスパートシステム，数理科学，No.284，pp.46~54，1987年2月。

(1989年10月2日受付)