【土木学会論文集　第410号／Ⅰ-12　1989年10月】

ファジィ理論に基づく美観を考慮した橋梁設計に関する一考察

AESTHETIC BRIDGE DESIGN BASED ON FUZZY SET THEORY

古川浩平*・古田　均**・中尾絵理子***・浅津直樹****

By Kohei FURUKAWA, Hitoshi FURUTA, Eriko NAKAO and Naoki ASAZU

In the design of bridge structures, it is necessary to account for aesthetic feature in addition to safety and economy. However, it is not easy to deal with the aesthetic factors in a quantitative way. In this paper, an attempt is made to apply the concept of fuzzy sets for the aesthetic design of bridges. As a typical type of bridge, pi-shaped bridge is employed. In order to examine and discuss the aesthetic characteristic of pi-shaped bridge, a survey was conducted, in which a set of questionnaires were distributed among experienced bridge designers. Based on the results obtained from the survey, several design factors are investigated using membership values as a comparative measure. It is concluded that the fuzzy set theory is useful for introducing aesthetic factors in the structural design, because it can treat them in a mathematical or quantitative manner.

Keywords: *aesthetic design, bridge, fuzzy set, questionnaire*

1. 緒　言

橋梁各部の形状および寸法は，主として経済性と安全性のバランスを考えて決定される．しかし，このほかに形状の美しさや，架設地点の環境との調和等の，美観面も加味して検討する必要がある[1),2)]．これらは，個人の主観に属する精神領域の問題を含み，非論理的で不確定な面をもっているため，数理的に取り扱うことが困難である．しかし，土木構造物は公共構造物として建設されることが多く，美観面の要因に関しても何らかの形で，数量化して表現し，その優劣を比較することが望ましい．従来，これらの非論理的かつ不確定性を有する要因の数量化に際しては，主として確率統計手法が用いられてきた．しかし，上述の美観に関する不確定要因は，事象自体のあいまいさの問題であり，事象の生起による不確かさ（確率またはランダム性）の問題ではない[3)]．

近年，このようなランダム性以外の不確定要因に対し，それらを取り扱う1つの考え方として，ファジィ集合の概念が提案されている[4)]．ファジィ集合の対象事象の境界をあいまいなものとして扱うという特徴を利用することにより，美観に関する評価者個々の主観の違い，同じ人でも時期，場所，角度等のさまざまな条件で評価が“ゆらぐ”という問題点をある程度解消できるのではないかと考えられる．

本研究では，Π形ラーメン橋を対象として，ファジィ集合の考え方を利用して，美観に関する以下の諸問題に取り組む．

① 人々の橋梁の形態に対する好みは，どのようなものであるか．

② 美観に関する要因の中で重要なものは何か．

③ 実際の設計に，人々の好み（要求）をどのように反映させるか．

ファジィ集合の概念を導入するにあたって，重要なポイントとなるのがメンバーシップ関数の決定方法である．メンバーシップ関数を通して人々の好みを知り，さらに，ファジィ数理計画法を応用して，美観を考慮した形状の最適解を求める問題を考えた場合，メンバーシップ関数の影響は非常に大きい[5)]．そこで，本研究では文献6)，7）に従って，計量心理学の手法である一対比較によるアンケート調査を行い，メンバーシップ関数を求

* 正会員　工博　山口大学教授　工学部土木工学科
（〒755　山口県宇部市常盤台2557）
** 正会員　工博　京都大学助教授　工学部土木工学科
（〒606　京都市左京区吉田本町）
*** 正会員　山口大学教務員　工学部建設工学科
（〒755　山口県宇部市常盤台2557）
**** 正会員　工修　復建調査設計（株）（前・山口大学大学院生）（〒732　広島市東区光町2-10-11）

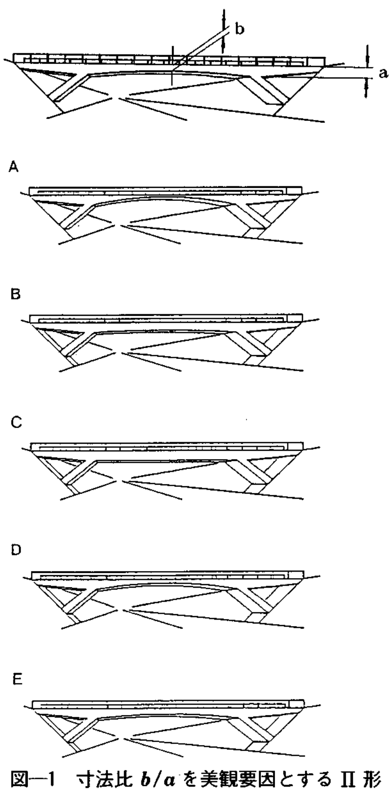
めることを試みる．今回のアンケートの対象は，橋梁設計の専門家であり，公団・地方公共団体・橋梁設計会社・建設会社で直接設計にかかわっている63人を選んだ．

上述の問題①，②に対しては，美観要因の『好ましさ』および『重要度』について，このアンケート調査の結果を解析することにより解答を得る．また，問題③を解決するにあたっては，Π形ラーメン橋について，経済性と安全性のみを考慮した形状の最適解を求めることを試みる．この最適解とアンケートの結果を比較検討することにより，問題の解明を図る．

2. 一対比較法によるメンバーシップ関数の決定法

(1) 一対比較法による評価値の算出

一般に，メンバーシップ関数値をアンケート調査で直接的に求めることは困難である．美観要因として，たとえば，図―1に示すΠ形ラーメン橋の寸法比 b/a を例にとれば，図―1のA, B, C, D, Eの5つの形状に対して『好ましさ』のメンバーシップ関数をすべて答える（たとえば，Aのメンバーシップ値0.7，Bのメンバーシップ値0.4等）ということは，非常に難しい．なぜならば，メンバーシップという概念が被験者にとって一般的でないうえに，多くの数値を同時に，しかも整合性をもって評価することは非常に困難なためである．そこで，メンバーシップ関数を求めるのに先立ち，おのおのの美観要因の好ましさおよび各要因間の重要さについて，相対的な評価値を算出することを考える．



図―1 寸法比 b/a を美観要因とするΠ形ラーメン橋

評価値の算出には，Saaty[6] が提案した，一対比較アンケート調査を用いる．これは，複数の要素のうちある2つの要素について，一方の要素が他方の要素よりもどれだけ勝れているかを，比の形で評価してもらう方法であり，複数の要素間の相対的評価値を一度に答えてもらうよりは，被験者の負担は軽く，しかも妥当性がある．例として，美観要因の寸法 b を考えた場合，5つの数値として，（b/a=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0）により描いた図を被験者に示す．この5つの数値に対応する，図―1のA, B, …, Eの形状のうち2つを取り出して，どちらがどれくらい好ましいかを回答してもらう．5つに限定したのは過去の経験[7]から被験者の負担を考慮したものである．

いま，5つの要素（A～Eの形状を指す）のうち2つの要素 i, j に対して一対比較を行い，j に対する i の相対的評価値 e_{ij} を求めれば，この e_{ij} を要素とする，以下の5行5列の行列 $\boldsymbol{E}$ を得る[6]．

$$\boldsymbol{E}=\begin{vmatrix} 1 & e_{12} & e_{13} & e_{14} & e_{15} \\ \cdot & 1 & & & \cdot \\ \cdot & & 1 & & \cdot \\ \cdot & & & 1 & \cdot \\ e_{51} & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{vmatrix} \quad\cdots\cdots(1)$$

ところが，$\boldsymbol{E}$ の要素はある2つの要素にのみ注目して，一対比較により得られた結果であるから，その関係に矛盾が生じていることがある．そこで一貫性をもたすために，以下の固有値解析を行う．

$$\boldsymbol{EW}=\lambda\boldsymbol{W} \quad\cdots\cdots(2)$$

ここに，

$$\boldsymbol{W}=(w_1, w_2, w_3, w_4, w_5)^t \qquad t：転置 \cdots\cdots(3)$$

λ は $\boldsymbol{E}$ の固有値の実数最大値である．このとき，式（2）を解いて得られる固有ベクトル $\boldsymbol{W}=(w_1, w_2, w_3, w_4, w_5)$ を要素A, B, C, D, Eに対する『好ましさ』の相対的評価値と考えることができる．また，一対比較が正確に行われれば行われるほど，実数最大の固有値 λ は5に近くなる．

(2) メンバーシップ関数の算出

前節で述べた『好ましさ』の相対的評価値を，『好ましさ』というファジィ集合に属する度合いと考えれば，これをメンバーシップ値とみなすことができる．メンバーシップ値 m は，その定義より $0 \leqq m \leqq 1$ でなければならず，m の値が1に近いほどそのファジィ集合に

属する度合いは大きく，逆に m の値が0に近いほど属する度合いは小さいとされている．ところが，式（2）を解いて得られた固有ベクトル $\boldsymbol{W}$（相対的評価値）は，$0 \leqq m \leqq 1$ であるとは限らない．そこで本研究では，次式に示すように，固有ベクトルの要素のうち最大のものが1となるように正規化を行い，メンバーシップ値 m を求める．

$$m_i = w_i / \max(w_1, w_2, w_3, w_4, w_5) \qquad (i=1,2,\cdots,5) \qquad (4)$$

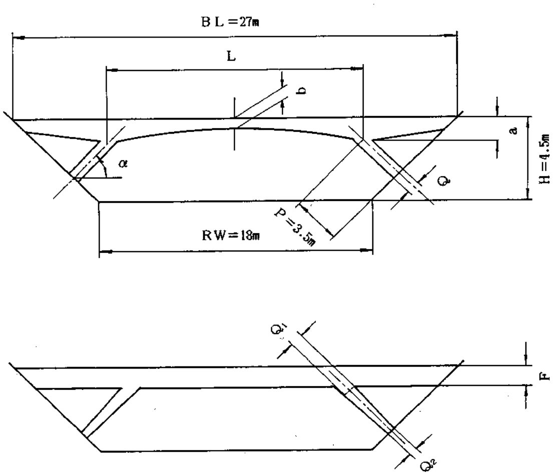
以上の手法を用いて，各個人のメンバーシップ値を算出し，これを平均しておのおのの要因のメンバーシップ値を決定する．

3. 美観要因の抽出

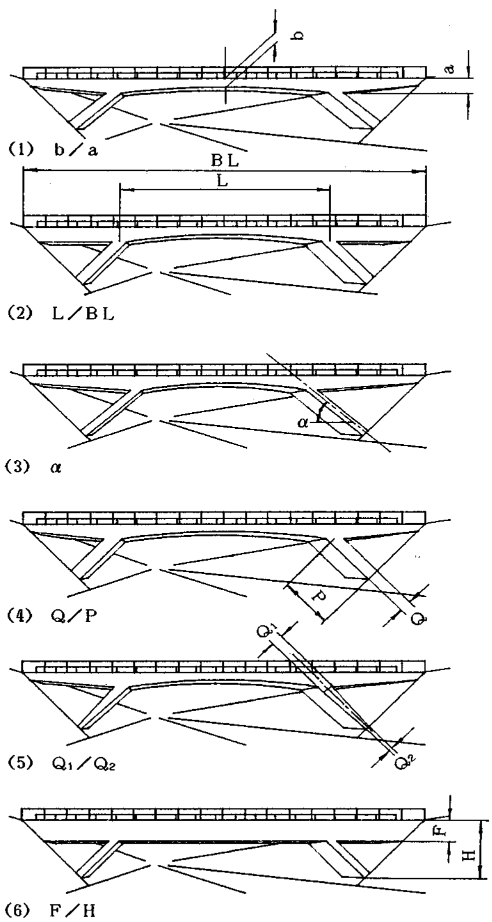
本研究では，モデルとして図―2に示すΠ形ラーメン橋を用いる．Π形ラーメン橋を選んだのは次の理由からである．まず，その形態が美観上興味深く，しかも跨道橋として頻繁に用いられ，人々の目に接する機会が多い点が挙げられる．また，橋梁としての構造が比較的簡単であり，構造解析を行ううえでモデルとして適当である．さらに，山本・早川の研究[8]との比較検討が可能である点も考慮に入れた．

このΠ形ラーメン橋は道路を跨いで架設され，架設条件として，路面からの高さ H を4.5 m，橋長 BL を27 m，道路幅 RW を18 mと仮定する．また，視点位置はドライバーを想定して路面上1.5 m，道路中央より左へ4.6 m，橋の手前60 mとする．以上は山本・早川の研究[8]と同一のものとなっている．

上記のように架設条件によって決定される設計変数を除いて，代表的な橋の美観要因として以下のパラメーターを考える．もちろん，これ以外にも重要な要因，あるいは組合せを考えることができるが，アンケートであまりに要因が多いと実施が難しいということ等の理由により，以下の6つのものを選んだ．これを図―3に示す．



図―2 Π形ラーメン橋の概略図



図―3 美観に関する要因

(1) b/a ：脚柱の節点部での桁厚に対する，橋中央部での桁厚の割合
(2) L/BL ：橋全体の支間に対する，中央支間の割合
(3) α ：脚柱の傾斜角（°）
(4) Q/P ：脚柱の長さに対する，脚柱の厚さの割合
(5) Q_1/Q_2 ：脚柱支点部での厚さに対する，脚柱節点部での厚さの割合
(6) F/H ：橋の高さに対する，桁厚の割合

4. 専門家に対するアンケートと考察

（1） アンケート内容

美観要因に関するメンバーシップ値を算出するために，橋梁の専門家に対し，一対比較アンケート調査を実施する．橋梁の専門家を選んだのは，長年の経験から力学的な橋梁形態ばかりでなく，人々に好まれる橋梁形態

を把握していると考えたからである．アンケートは以下の２回に分けて行った．調査人数は，第１次アンケートでは63名，第２次アンケートでは54名である．

a）第１次アンケート

これは3.で述べたおのおのの美観要因について，要素間の『好ましさ』に対するメンバーシップ関数を算出するための調査である．そのアンケートの一部を図—4に示す．このアンケート例に示すように，図—1に示したように図のパラメーターをランダムに種々変化させた図を被験者に示し，(A, B), (A, C), (A, D), …, (D, E）の順で２つの図を挙げて，どちらがどれだけ好ましいかを図中の５段階の評価値で回答してもらう．この調査では被験者に対し,美観要因が何であるのか,パラメーターの値をいくらにとったか等の情報は一切与えない．これは被験者に対して，美観のみの純粋な評価を期待するためである．

b）第２次アンケート

第２次アンケートでは,美観要因相互間の美観上の『重要さ』について調査する．これは第１次アンケートと同様に,『重要さ』に対するメンバーシップ関数の算出を目的としている．第１次アンケートで回答を得た同じ集団に対し，図—3に示す(1)〜(6)の要因を明示した図を挙げ，『好ましさ』の場合と同様に，２要因間の『重要さ』の相対的評価値を５段階評価で回答してもらう．

またこの第１次アンケートと第２次アンケートには１か月の間隔を置き第１次アンケートに対する回答の影響が第２次アンケートに及ばないように配慮した．

（２） アンケートの解析結果と考察

a）好ましさに対するメンバーシップ関数形

図—5は，第１次アンケートの結果得られたメンバーシップ値および変動係数をプロットしたものである．図中○はメンバーシップ関数であり，□は変動係数を表わす．各要因の共通点として，メンバーシップ関数の形状が凸形であるのに対し，変動係数は凹形であるという点が挙げられる．この両者の関係を明らかにするために，その相関係数を求めた．この結果を表—1に示す．この表によれば，すべての要因について相関係数は−1に近い値となっており，メンバーシップ値と変動係数は明らかに強い負の相関があるといえる．すなわち，アンケート回答者が好ましいと認める要素についての評価は個人個人のばらつきが小さく，逆にあまり好ましくないとされる要素についての評価はばらつきが大きいと考えられる．

ここで，各要因のメンバーシップ関数の勾配に注目すると，要因(3), (4), (6)については，頂点付近の勾配がかなり急なものとなっており，好ましいとされるパラメーター値が比較的狭い領域に絞り込まれているといえる．逆に要因(1), (2), (5), 特に(5)については勾配が緩やかであり，好ましいとされる範囲にかなり幅がある．これら

次項に示す５種のπ型ラーメン橋をご覧下さい。これらの橋の美観のみを考慮して、その「好ましさ」の度合を、下表に示す１～５の整数値で評価して下さい。たとえば、アンケートの問いに、

B & E ＿＿＿

とある場合、ＢとＥの両者を比較して、Ｅの方が「かなり好ましい」と判断したなら、

B & Ⓔ 4

といったように、好ましいと判断した方を○で囲み、その評価を下表による数値で下線のところに記入して下さい。また、ＢとＥについて、両者の好ましさが等しいと判断したなら、

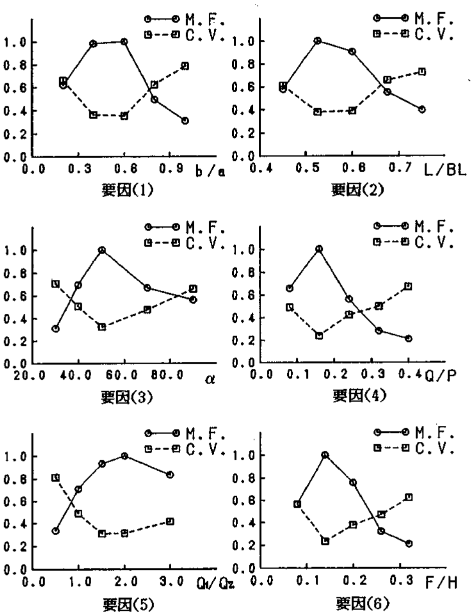
B & E 1

と記入して下さい。

評価	定義
5	明らかに好ましい
4	かなり好ましい
3	まあまあ好ましい
2	どちらかといえば好ましい
1	好ましさが等しい

1 A & B ＿＿＿
2 A & C ＿＿＿
3 A & D ＿＿＿
4 A & E ＿＿＿
5 B & C ＿＿＿
6 B & D ＿＿＿
7 B & E ＿＿＿
8 C & D ＿＿＿
9 C & E ＿＿＿
10 D & E ＿＿＿

図—4 各要因についてのアンケート例



図—5 各要因のメンバーシップ値および変動係数

表—1 メンバーシップ関数と変動係数の単純相関係数

要因	1	2	3	4	5	6
相関係数	-0.9725	-0.9394	-0.9887	-0.9255	-0.9873	-0.8921

表—2 6要因相互間の重要さ

要因	評価値	変動係数	メンバーシップ値	変動係数
1	0.5568	0.4468	1.0000	0.4917
2	0.5504	0.4574	0.9885	0.5147
3	0.4738	0.4970	0.8510	0.5288
4	0.4220	0.5719	0.7579	0.5867
5	0.3044	0.6710	0.5468	0.6953
6	0.5394	0.5055	0.9688	0.5305

の要因については満足解の範囲が広く，設計上の自由度が大きい要因と考えることができる．

b）『重要さ』に対する帰属度について

第2次アンケートの結果から求めた6要因相互間の美観上の重要さに対する評価値，メンバーシップ値，変動係数を表—2に示す．この表によれば，要因(1), (2), (6)についてのメンバーシップ値はほとんど1とみなすことができる．メンバーシップ値の定義からすれば，これらはすべて非常に重要な要因であるといえるが，本研究でのメンバーシップ値は評価値の最大値を1にする正規化から得られたものであり，この点に留意する必要がある．しかし，これらの要因の重要度はほぼ等しく，また他の要因よりは比較的重要度が高いと判断することは可能である．要因(1)の b/a は中央支間におけるアーチ状の曲線形を決定する主たる要因であり，この曲線が橋全体の印象を大きく左右する．また，要因(2)の L/BL は橋全体の部材寸法を決定するものであり，b/a と同様に橋の印象を決定付ける重要なパラメーターといえる．要因(6)については F/H によって全スパンを通じて桁厚が一様に変化し，橋の安定感に大きくかかわっていると思われる．以上のような理由で，要因(1), (2), (6)は比較的重要度が高くなっていると考えられる．これに対し，要因(5)の重要度が小さいのは Q_1/Q_2 というパラメーターが局所的なものであり，橋全体の印象に及ぼす影響が小さいためであると思われる．要因(3)の α によっても橋の形状はかなり左右される．要因(3)は要因(1), (2), (6)ほどではないが，重要度は高いといえる．

また，変動係数は『好ましさ』の場合と同様に大きく，個人個人の考えがかなりばらついていることがわかる．

c）民間企業と公共団体の比較

『好ましさ』に対するメンバーシップ関数について，民間企業に属する専門家と公共団体に属する専門家とで差があるかどうかを調べた．メンバーシップ値について両者の相関係数を求めた結果を表—3に示す．この表によれば，要因(5)についての相関性がやや小さいものの，全体的に完全相関である1.0に近く，民間企業と公共団体ではほとんど差がないことがわかる．

d）経験年数による比較

表—3 民間企業と公共団体のメンバーシップ関数の単純相関係数

要因	1	2	3	4	5	6
相関係数	0.9544	0.9727	0.9690	0.9577	0.8926	0.9817

表—4 経験年数15年以上と15年未満のメンバーシップ関数の単純相関係数

要因	1	2	3	4	5	6
相関係数	0.9789	0.9654	0.9951	0.9830	0.9618	0.9878

c）の場合と同様な方法で，専門家の経験年数によるメンバーシップ関数に差があるかどうかを調べた．経験年数は15年未満（34人）と15年以上（29人）で分けている．表—4にメンバーシップ値の相関係数を示す．相関係数はすべての要因でほとんど1に近く，経験年数によるメンバーシップ値の差はないといえる．

e）専門家と一般の人の比較

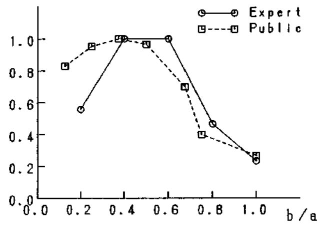
本研究での調査対象は橋梁の専門家に限っているが，美観が主観的なものである以上，一般の人の考えを知る必要がある．

山本・早川[8]は一般の人に対し，同じ Π 形ラーメン橋の b/a のパラメーターについて，確率論による一対比較アンケート調査を行っている．しかしこの調査は本研究での調査と次のような点で異なっている．

本研究では式（1）の行列要素 e_{ij} を求めるために，j に対する i の好ましさを5段階評価で答えてもらった．しかし，山本らの場合は j に対して i が好ましいかどうかだけを答えてもらい，被験者が i の方が好ましいと答える確率を e_{ij} としている．好ましさを5段階で答えるということは，被験者に大きな負担をかけるため，一般の人を対象としたアンケート調査では不可能と考えられたためであろう．これに対して本研究では橋梁設計の専門家に対するアンケートであるため，このような5段階評価を用いたアンケートが可能になったと考えられる．本研究で用いたアンケート方法は被験者への負担は大きいが，それ以上に得られる情報の密度や精度は高いと考えられるが，すべての人に対して実施することはできないと考えられる．これらの結果を比較する場合，両者のアンケートが異なっているため単純に比較することは難しい．そこで，山本・早川の研究結果から e_{ij} を求めることは不可能なため，本研究の調査で求まった e_{ij} に対し，以下の変換を加えることにより，山本らの場合と同じ方法で行列要素 e_{ij} を求めることとした．

$$\left.\begin{array}{ll} e_{ij}=5,\ 4,\ 3,\ 2, & \rightarrow 1.0 \\ e_{ij}=\quad 1 & \rightarrow 0.5 \\ e_{ij}=1/2,\ 1/3,\ 1/4,\ 1/5 & \rightarrow 0.0 \end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

この新しく得られた行列について，専門家63名に対



図―6 専門家と一般の人の比較

して平均すれば，e_{ij} は j より i が好ましいと判断した人の確率となる．この方法で求めた専門家のメンバーシップ関数，および山本・早川の結果から得た一般の人のメンバーシップ関数を図―6 に示す．この図をみれば，一般の人のメンバーシップ関数は専門家のものに比べて，全体的に左側（b/a の値の小さい方）に推移していることがわかる．すなわち，一般の人は中央部の桁厚が専門家よりもう少し小さい方が好ましいと感じているようである．また，専門家は b/a が小さくなると極端に好ましいとは思わなくなり，力学的な面への配慮が大きく回答に反映しているものと考えられる．

5. 経済性と安全性のみを考慮した形状の最適化

（1） 最適化の方法

美観要素を実際の橋梁設計に取り入れるという問題を検討するには，まず，美的な好ましさを考慮せず，経済性と安全性のみを考慮した Π 形ラーメン橋の最適形状を知る必要がある．本章では，アンケート調査で用いた Π 形ラーメン橋の形状について，数理計画法を用いて形状の最適化を試みる．

この最適化問題の目的関数には橋の総重量（W）をとり，設計変数は 3. で述べた美観要因に対応させ，次に示す 6 変数とする．

(1) a ：脚柱接合部の桁厚
(2) b ：橋中央の桁厚
(3) L ：脚柱節点部間の距離
(4) α ：脚柱の傾斜角
(5) Q_1 ：脚柱の節点部の厚さ
(6) Q_2 ：脚柱の支点部の厚さ

したがって，この最適化問題は，次式を満足する $\{a, b, L, \alpha, Q_1, Q_2\}$ を決定するという非線形最適化問題となる．

$$\left.\begin{array}{l}\text{目的関数：} Z=W(\{a, b, L, \alpha, Q_1, Q_2\}) \rightarrow \min \\ \text{制約条件：} g_i(\{a, b, L, \alpha, Q_1, Q_2\}) \leqq 0 \quad (i=1, \cdots, l)\end{array}\right\} \cdots\cdots(6)$$

式（6）で示される制約条件としては，以下に挙げるものがある．

まず，応力の制約を考えれば，中央径間，両端径間，脚柱に対してそれぞれ，次の 3 式を満足しなければならない．

$$\left.\begin{array}{ll}\max|\sigma_{cj}|-\sigma_{ca} \leqq 0 & (j=1, \cdots, n) \\ \max|\sigma_{s1j}|-\sigma_{sa} \leqq 0 & (j=1, \cdots, n) \\ \max|\sigma_{s2j}|-\sigma_{sa} \leqq 0 & (j=1, \cdots, n)\end{array}\right\} \cdots\cdots(7)$$

ここに，σ_{cj}, σ_{s1j}, σ_{s2j} はそれぞれ各部材のコンクリート，引張り側鉄筋，圧縮側鉄筋の応力，また σ_{ca}, σ_{sa} はコンクリート，鉄筋の許容応力であり，断面を n 等分して，各断面に対して計算する．

また，脚柱に関しては座屈の危険性があり，式（7）の応力制約だけでは不十分である．そこで，P_Z を軸荷重（脚柱の軸力）として次の制約を加える．

$$P_0-P_Z \leqq 0 \cdots\cdots(8)$$

ここで，P_0 は許容軸荷重であり，示方書[9]より次式で与えられる．

$$P_0=(0.85\,\sigma_{ck}A_c+\sigma_{sy}A_s)/3 \cdots\cdots(9)$$

ここに，σ_{ck}, σ_{sy} はコンクリート，鉄筋の応力度，A_c, A_s はコンクリート，鉄筋の断面積である．

以上の力学的な制約のほかに，橋の架設条件からの制約として，道路幅による脚柱支点部間の距離についての制約を加えねばならない．すなわち，脚柱が道路上にはみ出さないために，次式を満足する必要がある．

$$RW-RW_{AB} \leqq 0 \cdots\cdots(10)$$

ここに，RW は道路幅，RW_{AB} は脚柱支点部間の距離である．

（2） 最適化の結果と考察

本研究では文献 10）の設計例を参考にして，RC 一等橋として設計し，鉄筋比は次に示すように定数とする．

中央径間：$p_1=0.003$, $p_2=0.005$
両端径間：$p_1=0.005$, $p_2=0.010$
脚柱　　：$p_1=0.003$, $p_2=0.003$

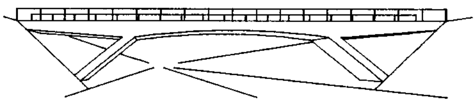
ここで，p_1 は正の曲げモーメントに対する引張り鉄筋の鉄筋比，p_2 は圧縮鉄筋の鉄筋比である．また，鉄筋およびコンクリートの許容応力はそれぞれ，12 000 tf/m², 600 tf/m² としている．

以上の条件で，COPES[11] により最適化を行った結果を表―5，図―7 に示す．また，図―8 は，最適形状に対する最大曲げモーメント図である．要因ごとに特徴をまとめると以下のようになる．

a） 桁厚 a, b

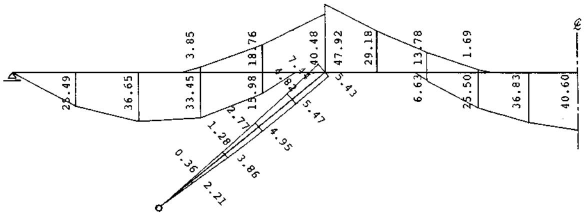
表―5 最適化の結果

a (m)	1.0997	重量W (t)	241.30
b (m)	0.6357	支点間距離 (m)	19.055
L (m)	12.988	脚注の軸力 (t)	62.57
α (°)	39.990	許容軸力 (t)	62.57
Q₁ (m)	0.4960		
Q₂ (m)	0.5055		



b/a=0.578　L/BL=0.481　α=39.99°　Q_1/Q_2=0.981

図—7　最適化の結果



図—8　最適形状における最大曲げモーメント図

図—8 をみればわかるように，中央径間において，正の曲げモーメントは中央部で最大となり，負の曲げモーメントは脚柱節点部で最大となる．正負の最大曲げモーメントの値はそれほど変わらないが，正の曲げモーメントに対しては床版を含むT形断面となり，圧縮応力に対するコンクリートの断面積が増えるため，桁厚を小さくできる．したがって，中央径間では中央部ほど桁厚を小さくでき，b/a の値は 0.6 程度となる．

b）脚柱節点部間の距離 L

表—5 より，L の長さは 13 m 程度である．これより長ければ中央径間の応力が増大し，短かければ両端径間の応力が増大する．すなわち，中央径間と両端径間のバランスがとれているところに，L の値は落ち着いていることになる．

c）脚柱の傾斜角 α

表—5 より α の値は 40° 程度である．脚柱だけの重量は，L が同じであれば $\alpha=45°$ のとき最小となり，全体的な重量や応力を加味しても，α がこの付近の値となることは予想できる．脚柱の曲げモーメントに着目すれば，桁に対するものと比べてかなり小さな値となっていることがわかる．つまり，脚柱に対する正負の曲げモーメントを，両方とも減らすような角度が 40° であったと考えることができる．

d）脚柱厚 Q_1，Q_2

脚柱の支点部はヒンジとして解析を行ったため，この点での曲げモーメントは 0 となり，本来ならば Q_1 は Q_2 よりも小さな値となるはずである．しかし，先に述べたように脚柱の曲げモーメントはきわめて小さく，脚柱に関しては座屈による制約だけがアクティブとなっている．このため，Q_1 と Q_2 はほぼ等しい値となっている．

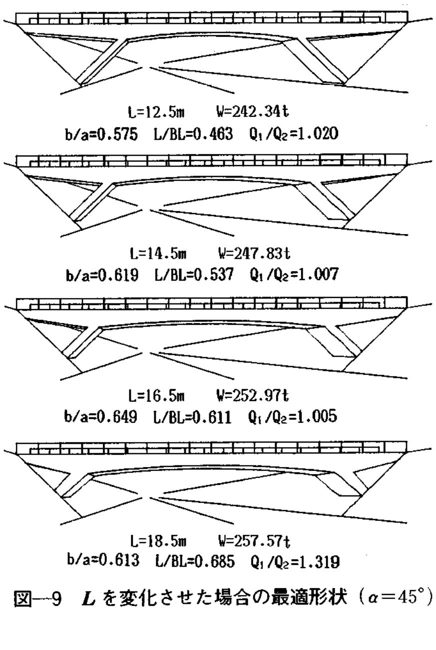
（3）設計変数の重要度に関する検討

美観要素を取り入れた最適化を行うためには，通常の設計における，設計変数の重要度を把握する必要がある．まず，桁厚 a，b は桁全体の自重を決定し，また，死荷重の大きさを決定するため，目的関数である総重量に及ぼす影響力は大きく，重要度が大であることは明らかである．これに対し，脚柱厚 Q_1，Q_2 は，ほとんど脚柱の自重にしか影響を与えず，また，座屈の制約だけで決定されることを考えあわせれば，重要度はそれほど大きくないと考えられる．しかし，脚柱節点部間の距離 L，および脚柱の傾斜角 α に関しては，その重要度を直感的に判断することは困難である．そこで，L と α に対しては次のような方法で，その重要度を解明することを試みた．

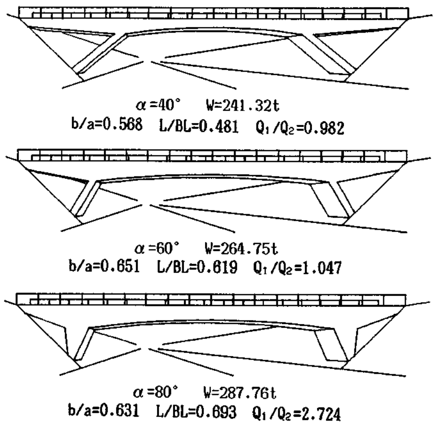
L：設計変数を a，b，Q_1，Q_2 の 4 つとし，α を 45° に固定して L を変化させて最適化を行う．これは，美観要因の(2)に対応させたものである．

α：設計変数を a，b，Q_1，Q_2 の 4 つとし，脚柱の支点部を固定して，α を変化させると同時に L も変化させて，最適化を行う．これは，美観要因の(3)に対応させたものである．

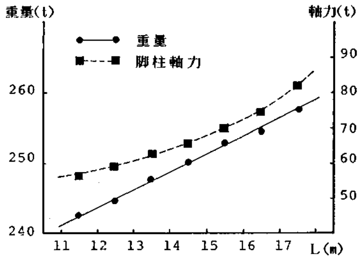
最適化の結果を図—9，図—10 に示す．また，図—11 はこの場合の総重量と脚柱軸力をプロットしたものである．図—11(a) より，脚柱間の距離 L は短いほど重量を軽減でき，最適化に有利であることがわかる．L が長い場合脚柱の長さは短くなり，脚柱の重量は軽減できるが，中央径間で応力が極端に増大する．このため，桁厚を大きくしなければならず，総重量としては増加する．L を 12 m から 18 m に増加させた場合，重量の増加量は 15 t 前後であり，図—9 のように橋の形状は大きく変



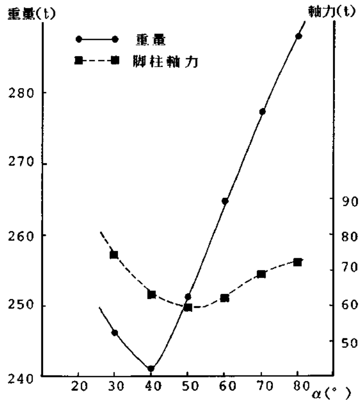
図—9　L を変化させた場合の最適形状（$\alpha=45°$）



図—10　α を変化させた場合の最適形状



(a) Lを変化させた場合



(b) αを変化させた場合

図—11　α, L の重要度に対する検討

化するものの，総重量は L によってそれほど変化しないといえる．

次に，図—11(b) をみれば，$\alpha=40°$ のとき総重量は最小となっている．これは，(2) の最適化の結果とよく一致している．α が 40° より大きい場合は，脚柱節点部間の距離が長くなり，桁の重量が極端に増加する．α が 40° より小さければ脚柱の長さが長くなり，脚柱の重量が増加する．また，脚柱の軸力に注目すれば，$\alpha=50°$ のとき最小となり，脚柱に関しては $\alpha=50°$ の方が有利であるといえる．$\alpha=40°$ のときの重量と $\alpha=80°$ のときの重量を比較すれば，40 t 以上の開きがあり，L を変化させた場合と比べてかなり大きいものとなっている．

以上の結果から判断すれば，形状に及ぼす影響力は L, α ともに大きいが，総重量に関しては，α は非常に重要であり，L はそれほど重要でないといえる．

6.　アンケート結果と力学的最適解の比較

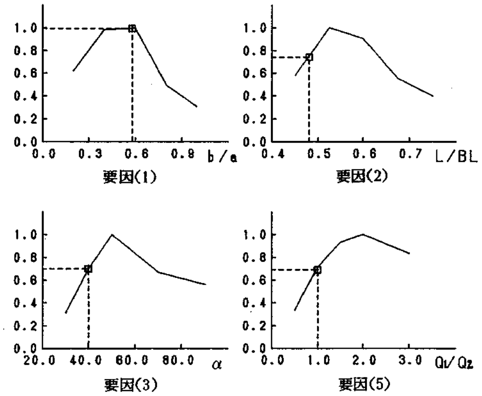
4. で求めた美観のみに注目した最適解，すなわちメンバーシップ値が 1 のものと 5. で求めた美観を全く考慮せず求めた最適解の間にどれだけの差があるかということは，興味深い問題である．この点が明らかになれば，実際の設計に美観要素を取り入れるうえでの 1 つの目安を得ることができる．この 2 つの最適解が一致すれば問題はないが，ずれているものについては，両者の満足度が一致するような方向で設計変数を決定する必要がある．

図—12 は 4. で求めたメンバーシップ関数のグラフ上に力学的最適解から求めた各要因の値を□でプロットしたものである．各要因ごとに比較，検討を行えば以下のようである．なお，要因(4)と要因(6)については，形態が少し異なるため直接的な比較は避ける．

a)　要因 (1) b/a

力学的最適解は $b/a=0.578$ となり，美観上の好みとほとんど一致している．しかし，これはメンバーシップ関数のグラフ上で頂点部の一番右側に位置しており，力学的には中央部の桁厚をやや大きめにとらなければならないことがわかる．

ところで，4. で述べたように，専門家と一般の人を比べた場合，専門家は b/a の値がやや大きい方を良しとしている．すなわち，力学的最適解，専門家の回答，一般の人の回答の順に b/a は小さくなり，美観上は中央の桁厚が薄い方が好印象を与えることがわかる．さら



図—12　力学的最適解における各パラメーター値の帰属度

に，これは専門家の回答に多少の力学的判断が加わっていることを示唆するものでもある．

b）要因（2）L/BL

このパラメーターは美観上の最適解と力学的な最適解の間に多少のずれが生じている．力学的には，中央径間での応力が許容応力を越えないように，L/BL をある程度小さく，すなわち脚柱節点部間の距離を短くした方がよいが，美観上はもう少し長い方が好まれるようである．これはこの距離が短いと脚柱が道路側に大きく張り出し，見た目に圧迫感を与えるためであると考えられる．

c）要因（3）α

力学的には $\alpha=40°$ 程度が良いという結果になっており，美観上の最適解 $\alpha=50°$ とずれている．α が小さいと，要因（2）の場合と同様に，脚柱が目立って圧迫感を与え，倒れてくるような不安定感があり，美観上は α が少し大きい方が好まれるという結果になっていると思われる．

5.（3）で考察を行ったように，この要因が力学的最適解に及ぼす影響は最も大きい．しかし表―2からもわかるように美観上の重要度は要因(1)，(2)に比べて小さいものと考えられる．このように，力学上と美観上の重要度に違いがあり，どちらに重点を置いて設計を行うかは技術者の判断にまかされることになろう．

d）要因（5）Q_1/Q_2

力学的には $Q_1/Q_2=1.0$ すなわち Q_1 と Q_2 は等しい値となっているが，美観上は脚柱の節点部よりも，支点部が小さい方がスレンダーさを感じるようである．このパラメーターが局所的であり，力学的にもあまり大きな影響を与えるものでもないという判断は，橋梁の専門家であれば可能であると思われる．したがって，力学的な判断はあまり加えられず，主に美的な好ましさから，アンケートに回答していると思われる．

以上のように要因によって多少の違いはあるものの，力学的最適解はすべてメンバーシップ値 0.65 以上に位置しており，美観上から比較的好ましい傾向にあるといえる．これは，橋梁という構造物を考えた場合，総合的な美しさというものは，力学的にみても不安感がなく，なおかつ形状が美しいことを暗示しているといえよう．

7. 結　言

本研究では非論理的かつ不確定な性格をもつ美観問題に対してファジィ集合の概念を導入し，その数理的な取扱いを試みた．その結果は次のようにまとめられる．

（1）一対比較アンケート調査を用いれば，美観上の『好ましさ』および『重要さ』という人間の感覚に由来する不確定要因をメンバーシップ関数という形で尺度化できる．このメンバーシップ関数を通して，人々が美観上好ましいとする橋梁形態や各要因の重要性を知ることができる．すなわち美観上の最適形状を得ることができる．

（2）Ⅱ形ラーメン橋を対象として美観上と力学的な重要性を比較した結果，美観上は桁厚や中央径間の大きさが上位となったが，力学的には脚柱の傾斜角の影響が最も大きかった．

（3）美観上の最適解と力学的最適解は一致する部分がかなりある．しかし，橋梁の形状を大きく変える設計変数については両者が一致しない場合がある．Ⅱ形ラーメン橋の場合，美観上からは中央径間を大きくとり，脚柱の傾斜角を大きくして，ドライバーの視野を広くするものが最も好ましかった．これに対して力学的には傾斜角を小さくし中央径間を狭くしたものが最適解となった．

（4）一般の人と専門家のアンケート結果に多少の開きがみられ，専門家であれば，『好ましさ』に力学的判断が付け加わった答となっている．

今後の課題として次の点が残されている．アンケートで得られたデータは個人個人でかなりばらつきが大きく単純に平均するだけでは不十分と思われる．逆に，ばらつきが大きいということは画一性を避ける必要性のあることを示唆するものでもあり，この点をどのように処理するかが問題となる．また，メンバーシップ関数が得られれば，ファジィ数理計画法などを応用して，経済性と安全性に加え，美観を考慮して形状の最適化が可能であると考えられるが，この具体的な方法を検討する必要があろう．

本論文では橋梁美観の評価の方法論について主として言及したが，各要因間の相互関係などについては今後さらに研究を進める予定である．

このようにいくつかの問題点は残されているものの，美観という個人の主観に属する問題を取り扱うのに，ファジィ集合の考え方は非常に適しており，本研究で得られた結果を実際の設計に生かしたいと考えている．

本研究を行うにあたり，アンケートに回答していただいた方々に深い感謝の意を表します．本研究の一部の計算にあたり当時山口大学工学部学生であった小郷昌典氏の助力を得た．また，本研究の計算には山口大学情報処理センターの ACOS-850 を用いた．記して謝意を表す．

参考文献

1）杉本博之：北海道における歴史的橋梁の景観，北海道の橋の景観，pp. 19～30，1989年2月．
2）杉本博之：見苦しい橋梁景観について，北海道の橋の景観，pp. 31～34，1989年2月．
3）古田　均：構造物のファジィ診断，日本機械学会誌，第90巻，第827号，pp. 1277～1281，1987年10月．

4) Zadeh, L. A. : Fuzzy Sets, Information and Control, Vol. 8, No. 3, pp. 338～353, 1965.
5) 西村 昭・藤井 学・宮本文穂・富田隆弘：橋梁診断のシステム化に関する基礎的研究，土木学会論文集，第378号／V-6, pp. 175～184, 1987年2月.
6) Saaty, T. L. : Measuring the Fuzziness of Sets, Journal of Cybernetics, Vol. 4, No. 4, pp. 53～61, 1974.
7) 古川浩平・古田 均・仁多和英：一対比較法の最適耐震設計への応用に関する研究，土木学会論文集，第368号／I-5, pp. 393～400, 1986年4月.
8) 山本 宏・早川浩平：計量心理学を応用した橋梁形態の一考察，土木学会論文集，第362号／I-4, pp. 267～275, 1985年10月.
9) 土木学会：コンクリート標準示方書，昭和49年制定.
10) 幕田貞夫：鉄筋コンクリート ラーメン橋設計法と設計例，理工図書.
11) Madsen, L. E. and Vanderplaats, G. N. : COPES—A FORTRAN CONTROL PROGRAM FOR ENGINEERING SYNTHESIS, Users Manual, Naval Postgraduate School, Monterey, March, 1982.

(1989. 3. 27・受付)