

かたちの見え方の類似性による下路式アーチ橋の形状分類に関する基礎的研究

A Study on Arch Bridge form Classification with Visual Characteristic

政木英一、伊藤学、窪田陽一

Hidekazu MASAKI Manabu ITO and Yoichi KUBOTA

*工修 国際航業(株) 東日本事業本部 企画二部 企画一部 (〒102 東京都千代田区六番町2番地)

**工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338 埼玉県浦和市下大久保255)

***工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338 埼玉県浦和市下大久保255)

In this study, arch bridge form was classified into several groups with visual characteristic for visual reference of bridge form. Arch bridge form could be divided into several components and each component was classified into several visual patterns. All components and these patterns are reference-key for referring existing bridge data. Because of uncertain judgment on arch bridge form recognition, the authors took into consideration of such uncertain judgement on classifying components. To consider such uncertain judgement of bridge form similarity, fuzzy set theory is suitable. Arch bridge form similarity was classified into thirteen groups by fuzzy set theory. By using these results of classification of arch bridge form, it is effective to refer existing bridge data by means of visual image of bridge form.

1. 緒言

橋梁はそれを構成する部材の材料やその組み合わせを変化させることで様々な形状を作り出すことが可能な構造物である。一般的に橋梁は、他の土木構造物と比べ自由度の高い形状を作り出すことが可能である。この橋梁の特徴から、古くから橋梁は、単にその機能を果たすだけでなく、造形的な面で優れていることも必要とされている。著者等は、橋梁景観設計において形状を造り出すことを支援するシステムの開発を既に行っている^{1), 2)}。そして、支援システムの一つとして、橋梁の「かたち」から検索することのできる橋梁形状検索型データベースシステムを提案した³⁾。橋梁形状検索型データベースシステムは、既存橋梁データベースシステムとは異なり、検索条件を橋梁形状を描画して入力することで、既存橋梁を検索することを可能にしたものである(図-1)。形状検索型データベースシステムにより、橋梁景観設計において、プランナーのイメージする橋梁を形状から直接検索することができるようになった。さらに、形状検索型データベースシステムの開発にともない、既存橋梁の分類は力学的側面からのみの分類では不十分であり、橋梁の視覚特性を考慮した分類が必要であることを提唱した。例えば、プランナーが下路式のアーチで垂直支材

が5本の橋梁形状を描画して既存橋梁を検索した時、橋梁の視覚特性を考量していない場合は、下路式アーチで垂直支材が5本の既存橋梁のみを検索することになる。しかしながら、橋梁の視覚特性を考慮し、「垂直支材が3~5本の時は、類似した形状と判断される」という情報をデータベースに蓄積しておくことで、垂直支材が5本である既存橋梁ばかりでなく、垂直支材が3又は4本である既存橋梁を検索することが可能になる。

このように形状による検索を可能にするために、橋梁

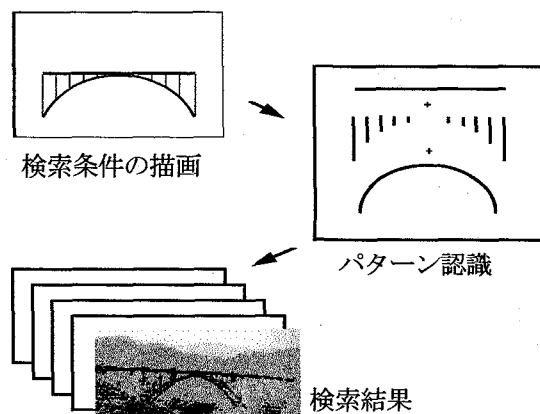


図-1 形状検索型データベースシステムの概略フロー

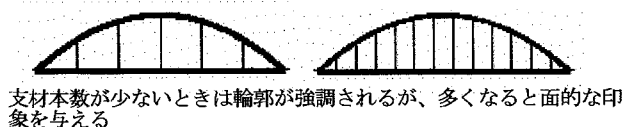
の視覚特性を考慮した橋梁の分類が必要であると考えられる。しかし、橋梁の力学特性を全く無視した分類は、事実上何の役にも立たない物になってしまうため、本研究では、力学的特性による分類に、橋梁の視覚特性の一つである橋梁のかたちの見え方の類似性の概念を付け加えた橋梁の分類を試みた。また、橋梁のかたちの見え方の類似性の判断に存在する曖昧さを考慮するために、橋梁のかたちの見え方の類似性分析にファジー理論を適用し、橋梁を分類した。

本研究では、かたちの見え方の類似性による分類の基礎的段階として、分類対象に下路式アーチ橋を選定し、橋梁の分類を試みた。さらに、橋梁の視点場として、視線入射角 $=90^\circ$ （即ち橋梁の側面形状）、水平見込み角 $=60^\circ$ を選定した。視線入射角 $=90^\circ$ は、橋梁の形状を検討する上で最も一般的な視線入射角であり、水平見込み角 $=60^\circ$ は、橋梁の形状全体を見ることのできる水平見込み角の中で、最も大きな角度（橋梁の形状全体を見ることのできる水平見込み角の中で、最も形状の違いを判断できる角度）であるという理由で上述の条件を選定した。

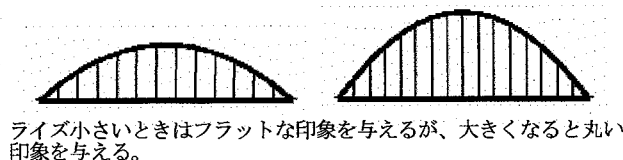
2 下路式アーチ橋形状を構成する要素

橋梁形状を構成する要素は、言うまでもなく橋梁を構成する部材である。アーチ橋形状を構成する要素は、アーチリブ、桁、床板、支材、横構、等が挙げられる。これらアーチ橋形状を構成する要素が、多様に変化することによって、同じアーチ橋であっても異なった見え方になる。

既存橋梁の事例から、下路式アーチ橋の側面形状を構成する要素は、アーチリブ、桁、支材の3要素と考えることができる。そして、上記の3要素の組み合わせやアーチリブや桁の高さ、アーチライズ、支材本数（支材間隔）等が変化することで、アーチ橋の側面形状が決定される（図-2）。本研究では、形状分類の初歩的段階として、構成要素の一つである支材を、垂直支材のみの場合に限定している。



(a) 部材本数による橋梁形状の分類



(b) アーチライズによる橋梁形状の分類

図-2 部材寸法、支材本数等によるアーチ橋側面形状の分類

3 垂直支材本数と橋梁のかたちの見え方の類似性

アーチ橋の垂直支材の本数（間隔）の変化により、橋梁のかたちの見え方の類似性は、どのように変化するのだろうか。例えば、他の要素を一定とし、垂直支材の間隔を7本とした場合と8本とした場合で、人は二つの橋梁形状を類似したかたちの見え方であると判断するのか、それとも異なるかたちの見え方であると判断するのか。この垂直支材の本数と橋梁のかたちの見え方の類似性との関係を調べるために、3.1に示す実験を行った。

3.1 支材本数と橋梁のかたちの見え方の類似性評価実験

(1) 評価対象となる支材本数の選定

本実験に用いる支材の本数は3～15本とする。なお、支材本数は、既存橋梁データ⁴⁾（58橋）を基に選定した。

(2) 実験方法

本実験に用いる橋梁形状は、支材本数以外の条件を一定とし、支材本数を3～15本に変化させたものを13種類作成した。また、実験に用いるアーチ形式には、アーチリブ高さと桁高さがほぼ一致するローゼ形式を選定した。図-3に本実験用いた部材寸法比を示す。部材寸法比は、既存統計データ⁵⁾及び既存橋梁データを基に選定した。

実験は、13枚のA4版のカードにスパンが27cmとなるように描いたものを、支材本数がランダムになるようにまとめた。これを被験者に1枚ずつ提示し、同じような橋梁のかたちの見え方であると感じるものについてグルーピングを行ってもらった。橋梁形状の水平見込み角が 60° になるようにするために、被験者とカードとの距離が23cm程度になるようにカードを持たせた。グループ数は特に指定していない。被験者は学生27人であった。

(3) 実験の結果と考察

実験の結果、橋梁形状は2から9グループに分類された。橋梁側面形状を5グループに分類した被験者がもっとも多く7人であった。実験の結果、類似したかたちの

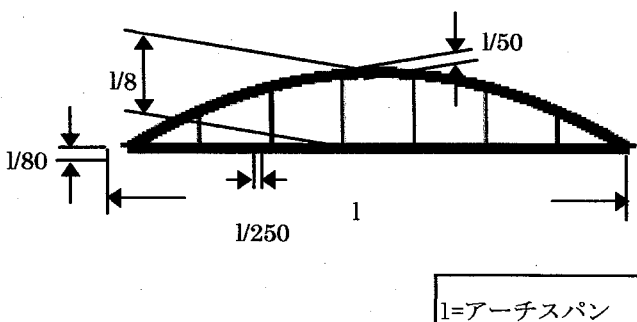


図-3 実験に用いた橋梁の部材寸法比

見え方と判断された支材本数の組み合わせを表-1に示す。

表-1より、比較される支材本数の差が大きくなるほど類似したかたちの見え方であると判断する被験者が少なくなることが容易に理解できる。また、支材本数3~6本と支材本数15の側面形状を類似したかたちの見え方であると判断している被験者が若干名だが存在する。これは、判断のミスであると考えられる。しかし、逆に考えれば、被験者にとって判断ミスが生じるほど類似したかたちの見え方であり、類似したかたちの見え方であると判断される可能性があると考えられる。そこで本研究では、この様なデータを無効データとせず、判断に曖昧さのあるデータと考え、有効データとする。

3.2 支材本数と橋梁形状のかたちの見え方の類似性による分類

人の類似性の判断には、曖昧さが存在することを考慮すると、表-1はファジー関係として表-2のように表すことができる。表中のスコアは、次式によって算出される。

$$\mu_R(i, j) = n_{ij} / N \quad \dots \text{式1}$$

ただし、

$\mu_R(i, j)$: 支材本数 i, j のメンバーシップ関数

i, j : 支材本数

n_{ij} : 支材本数 i 本と j 本を同じとした人数

N : 被験者総数

よって、ファジー関係 ($=R$) は

$$R = \int_{i \times j} \mu_R(i, j) / (i, j) \quad \dots \text{式2}$$

となる。

次に、支材本数 i における支材本数 j の類似度を $S_i(j)$ とすると、

$$S_i(j) = \mu_{ij}(i, j) \quad \dots \text{式3}$$

となる。例えば、支材本数 $i=3$ の類似度 $S_3(i)$ は以下のように表される。

$$S_3(i) = 1.0/3 + 0.6/4 + 0.4/5 + 0.2/6 + 0.1/7 + 0.1/8 + 0.1/9 + 0.1/10 + 0.1/11 + 0.1/12 + 0.1/13 + 0.1/14 + 0.1/15$$

次に、任意の二組の類似度 $S_i(k)$ 、 $S_j(k)$ の交わりの高さを求める(交わりの高さが高ければ二つのメンバーシップ関数の類似性が高いと言える)。即ち、類似度 $S_i(k)$ と $S_j(k)$ の類似性を調べることで、支材本数 i と j が同じグループであるか否かを判断する。交わりの高さ $h(S_i(k) \cap S_j(k))$ は、次式によって求められる。

$$h(S_i(k) \cap S_j(k)) = \bigvee_k \{ \mu_{ik}(i, k) \wedge \mu_{jk}(j, k) \} \quad \dots \text{式4}$$

ただし、 $\bigvee$ (max)、 $\bigwedge$ (min) を示す。交わりの高さの算出結果を表-3に示す。算出された交わりの高さ ($=h$) のファジー関係において、 $\alpha=0.5$ のレベル集合を求めそれらを比較すると、

$$S_{(0.5)3}(i) = S_{(0.5)4}(i) = S_{(0.5)5}(i) \\ S_{(0.5)6}(i) = S_{(0.5)7}(i) = S_{(0.5)8}(i) = S_{(0.5)9}(i)$$

$$S_{(0.5)10}(i) = S_{(0.5)11}(i) = S_{(0.5)12}(i) = S_{(0.5)13}(i) = S_{(0.5)14}(i) \\ S_{(0.5)15}(i)$$

なる関係になる。従って支材本数の変化による橋梁形状の類似性は、以下の4グループ (Vgn、ただし $n=1, 2, 3, 4$) に分類することができると考えられる。

Vg1: 3~5本

Vg2: 6~9本

Vg3: 11~14本

Vg4: 15本

各グループの類似度メンバーシップ関数、 $S_i(i)$ は以下の式により求められる。

$$S_{\alpha}(i) = \bigwedge_k \mu_{is}(k, i) \quad \dots \text{式5}$$

表-1 同様の形状と判断された支材本数

単位: 人

	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	27	16	11	5	4	3	4	0	0	0	0	0	1
4	16	27	15	10	4	6	3	0	1	0	1	0	2
5	11	15	27	11	8	5	4	0	0	0	0	0	1
6	5	10	11	27	14	9	6	1	3	2	3	1	2
7	4	4	8	14	27	15	13	3	3	3	3	2	1
8	3	6	5	9	15	27	17	7	9	7	8	5	3
9	4	3	4	6	13	17	27	11	11	10	11	8	4
10	0	0	0	1	3	7	11	27	18	21	17	18	5
11	0	1	0	3	3	9	11	18	27	18	20	15	9
12	0	0	0	2	3	7	10	21	18	27	23	18	9
13	0	1	0	3	3	8	11	17	20	23	27	16	11
14	0	0	0	1	2	5	8	18	15	18	16	27	11
15	1	2	1	2	1	3	4	5	9	9	11	11	27

表-2 支材本数による橋梁形状の類似性のファジー関係 (R)

	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	1.0	0.6	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.6	1.0	0.6	0.4	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
5	0.4	0.6	1.0	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.2	0.4	0.4	1.0	0.5	0.3	0.2	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1
7	0.1	0.1	0.3	0.5	1.0	0.6	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
8	0.1	0.2	0.2	0.3	0.6	1.0	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1
9	0.1	0.1	0.1	0.2	0.5	0.6	1.0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.1
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.4	1.0	0.7	0.8	0.6	0.7	0.2
11	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.4	0.7	1.0	0.7	0.7	0.6	0.3
12	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.4	0.8	0.7	1.0	0.9	0.7	0.3
13	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9	1.0	0.6	0.4
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.7	0.6	0.7	0.6	1.0	0.4
15	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	1.0

表-3 各支材本数 i における類似度ファジー関数の交わりの高さ

h	S(3)	S(4)	S(5)	S(6)	S(7)	S(8)	S(9)	S(10)	S(11)	S(12)	S(13)	S(14)	S(15)
S(3)	1.0	0.6	0.6	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
S(4)	0.6	1.0	0.6	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
S(5)	0.6	0.6	1.0	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
S(6)	0.4	0.4	0.4	1.0	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1
S(7)	0.3	0.4	0.4	0.5	1.0	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.1
S(8)	0.2	0.3	0.3	0.5	0.6	1.0	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
S(9)	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.6	1.0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
S(10)	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	1.0	0.7	0.8	0.8	0.7	0.4
S(11)	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.7	1.0	0.7	0.7	0.7	0.4
S(12)	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.8	0.7	1.0	0.9	0.7	0.4
S(13)	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.8	0.7	0.9	1.0	0.7	0.4
S(14)	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.7	0.7	0.7	0.7	1.0	0.4
S(15)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	1.0

ただし、 k はグループ n に属する支材本数である。例えば、 $n=1$ の時 (Vg1の時)、 $k=3, 4, 5$ となる。上式によって求められた、各グループのメンバーシップ関数を図-4に示す。

4 下路式アーチ橋形状のかたちの見え方の類似性

3.1の実験により、支材本数と橋梁側面形状のかたちの見え方の類似性は4グループに分類できることが明らかになった。橋梁側面形状を構成するその他の要因(アーチライズ、アーチリブ及び桁の高さ)を同時に変化させたとき、橋梁側面形状のかたちの見え方の類似性はどのように変化するのであろうか。本章では、橋梁側面形状を構成する3要素の組み合わせとかたちの見え方の類似性について評価実験を行い分類を行う。

4.1 橋梁側面形状のかたちの見え方の類似性に関する評価実験

(1) 評価対象となる橋梁形状の選定

ライズ比の変化によるかたちの見え方の類似性の分類は既に行っている³⁾。曲線形状の変化によりかたちの見え方の類似性は、3グループに分類することができると考えることができる。また、アーチリブ高さ及び桁高による変化は、アーチ形式の違いとしてとらえ、アーチ形式、ローゼ形式、ランガー形式の3グループの分類とした。曲線形状及び支材本数の値は、各グループの代表的な値(メンバーシップ値の最大値)を用いる。表-4に本実験に用いる3要素の詳細を示す。

(2) 実験方法

上述した3要素の全ての組み合わせ($3 \times 3 \times 4 = 36$)について、橋梁形状(36種類)を作成する。実験方法は2.1と同様の方法を用いる。また、それぞれの形式に用いる部材寸法は、既存統計データ及び既存橋梁事例をもとに求めた。本実験の被験者は、3.1の実験と同様学生27名であった。

4.2 橋梁側面形状のかたちの見え方の類似性による分類

3.2と同様の方法で橋梁側面形状をかたちの見え方の類似性により分類を行うと12のグループに分類することができると考えられる(Bg1~Bg12)。図-5にメンバーシップ関数の例を示し、図-6に橋梁側面形状のかたちの見え方の類似性による分類結果を示す。

分類の結果、橋梁側面形状のかたちの見え方の類似性には以下のような特徴があると考えられる。

- ① ライズ比のかたちの見え方のグループは、他の2つの構成要素の変化の影響を受けていない。即ち、ライズ比は橋梁側面形状のかたちの見え方の類似性に最も大きく影響を及ぼす構成要素であると考えられることができる。
- ② 支材本数のかたちの見え方の類似性のグループは、

ライズ比、橋梁形式のかたちの見え方のグループの影響を受け、類似性の判断が曖昧になる傾向にある。

③ 全体的に、アーチ形式とローゼ形式は、異なる形状と判断されない傾向にあると考えられる(Bg6~Bg12)。

④ ライズ比が最も小さいグループの時は、アーチ形式、ローゼ形式は支材本数に関係なく、類似したかたちの見え方であると判断されると考えることができる(Bg7)。

⑤ ライズ比が大きく、支材本数が多いとき、橋梁形式に関係なく同一のグループとして分類されると考えられる(Bg6)。また、ライズ比が大きくても、支材本数が少なくなると、ランガー形式は他の形式と区別されるが、ローゼとアーチの形状の違いは判断できず、支材本数で分類されると考えられる(Bg5, Bg11, Bg12)。

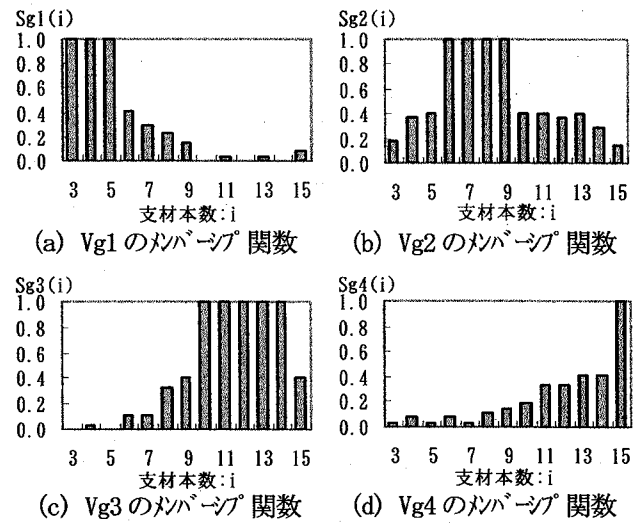


図-4 支材本数と各グループのメンバーシップ関数

表-4 実験に用いる構成要素の値

構成要素	要素の値			
橋梁形式	①アーチ	②ローゼ	③ランガー桁	
ライズ比	①0.125	②0.225	③0.4	
支材本数	①5本	②7本	③12本	④15本

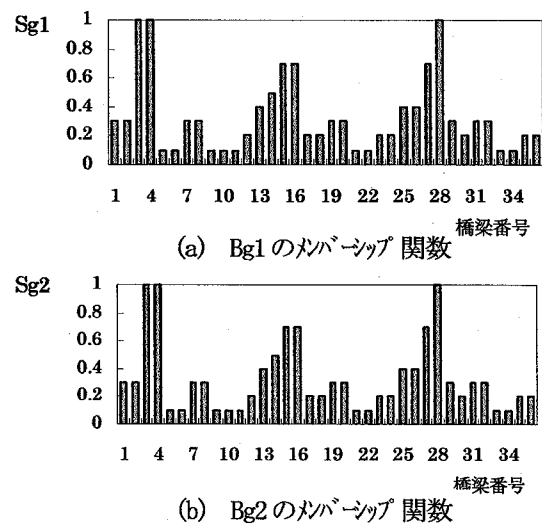


図-5 橋梁側面形状のかたちの見え方の類似性メンバーシップ関数の例

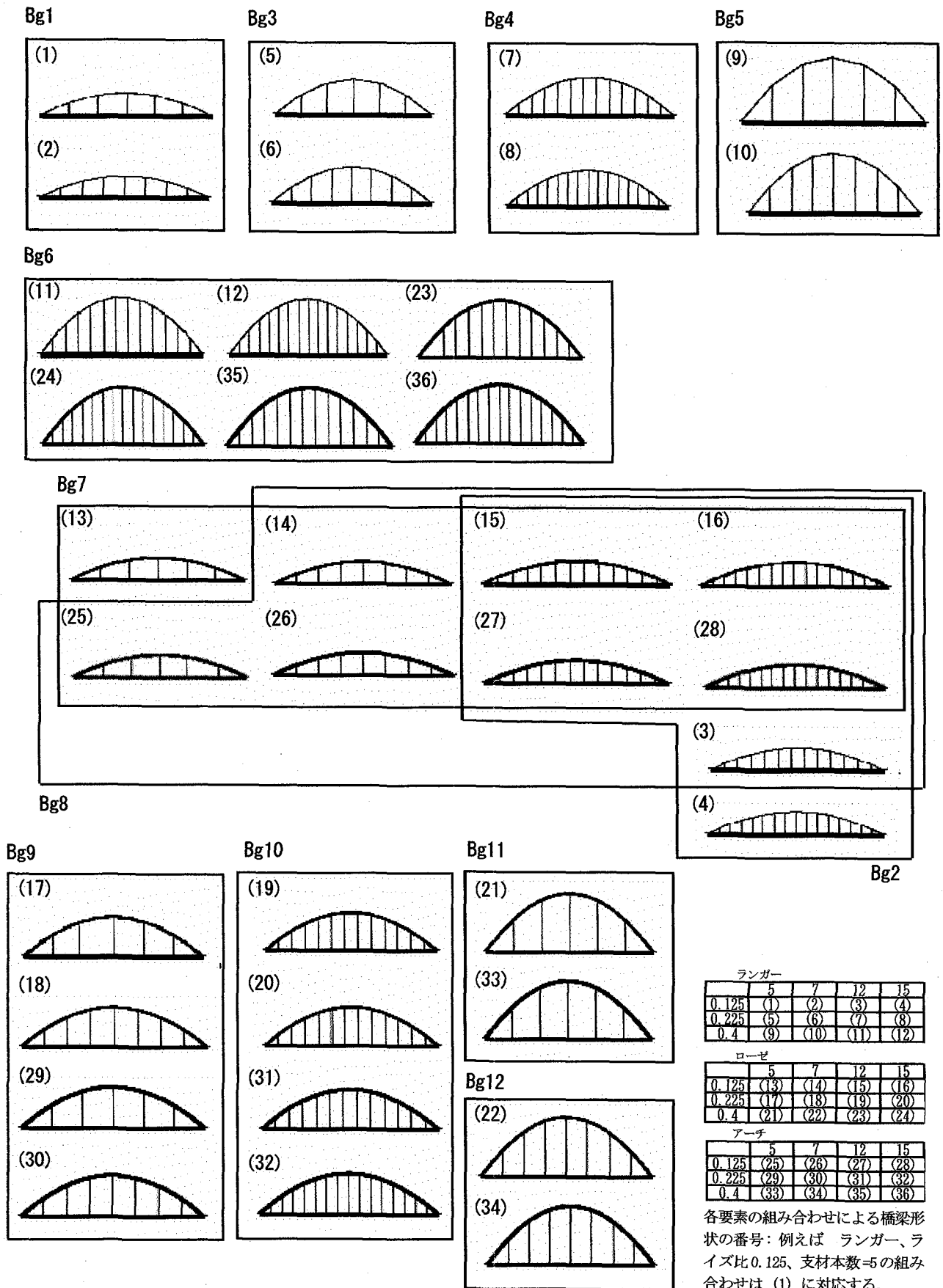


図-6 視覚特性を考慮した橋梁形状分類

5 分類結果の形状検索型データベースシステムへの適用

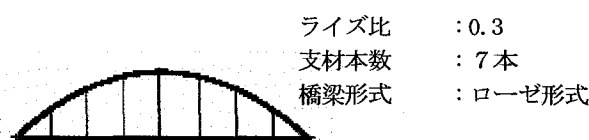
本研究により、橋梁形状のかたちの見え方の類似性による分類を用いることにより、既に述べた、著者等自らが開発を行っている形状検索型橋梁データベースシステムによる検索が、より柔軟に行うことができるようになる。例えば、イメージした橋梁形状を用いて既存橋料を検索した場合、複数の構造形式が検索される可能性がある。図-7は、かたちの見え方の類似性を考慮した、既存橋梁の検索例を示したものである。プランナーがイメージした橋梁形状をコンピュータ上で描画することで検索条件を入力し、それを橋梁形状の構成要素に分けて識別することで、検索に必要な数値情報等を得る(図-7(a))。図-7(a)で得た検索条件を基に、検索を行い、図-7(c)に示すような検索結果を得る。図-7(c)を見て明らかなように、検索結果はプランナーがイメージした形状ばかりでなく、例えば、図-7(c)の(17)、(29)のように支材本数が5本である既存橋梁を検索することが可能となる。このように、かたちの見え方の類似性を考慮したデータベースシステムとすることで、プランナーのイメージした橋梁のかたちの見え方は、どのような構造になるのかを知ることが可能となる。即ち、一般の人にとって、プランナーのイメージしたかたちの見え方になる橋梁の構造形式は複数存在する事を知ることができ、より柔軟な橋梁景観検討が可能となる。

6 結語

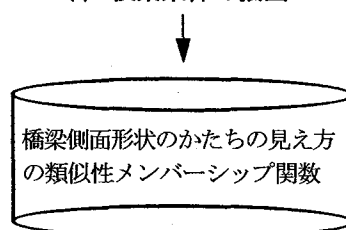
本研究では、かなり限定された条件であるが、橋梁形状のかたちの見え方の類似性による分類を試みた。本研究により、橋梁は、既存の構造的側面からの分類ばかりでなく、かたちの見え方の類似性による分類が可能であると考えることができる。そして、その結果をデータベースに蓄積する事により、かたちの見え方を考慮した既存橋梁検索を行うことが可能となる。

本研究では、下路式アーチ橋の支材のパターンが垂直支材のみの場合であり、橋梁の視点場は、視線入射角=90°、水平見込み角=60°の場合に限定している。今後、以下に示すことを考慮することで、より一層有効な、形状検索型データベースシステムのための橋梁のかたちの見え方の類似性による分類を行うことができる。

- ① 他の形式においても同様に形状を主体とした分類を行う。
- ② 様々な視点場を考慮し、橋梁の構成要素の変化と併せてかたちの見え方の類似性を評価する。

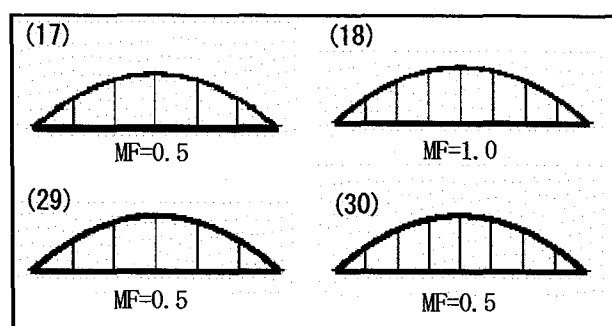


(a) 検索条件の描画



(b) かたちの見え方の類似性を考慮した既存橋梁検索

Bg9



MF: メンバーシップ値

MFが大きいほどかたちの見え方の類似性が高いことになる。

(c) 既存橋梁の検索結果

図-7 かたちの見え方の類似性を考慮した既存橋梁検索

【参考文献】

- 1) 窪田陽一、政木英一、吉川正嗣、橋梁景観設計プロセスに関する一考察、構造工学論文集, Vol39A, 1993/3
- 2) Yoichi Kubota, Hidekazu Masaki, Masatugu Yoshikawa CAS System for Structural Aesthetics for Bridge Form Computing in Civil and Building Engineering Proceedings of the Fifth International
- 3) 政木英一、伊藤学、窪田陽一、今福克、橋梁形状検索型データベースシステムに関する基礎的研究, 第20回情報システム論文集, 1995/10
- 4) 橋梁年鑑(昭和56年~平成2年), 社団法人 日本橋梁建設協会
- 5) 小西一郎、鋼橋(設計編 II), 丸善
- 6) 水本雅晴、ファジイ理論とその応用, サイエンス社
- 7) 日本ファジイ学会、講座ファジイ7知的情報処理とファジイ, 日刊工業

(1995年9月18日受付)