

維持・管理計画のための橋梁評価システムに関する基礎的研究

小間井孝吉*・木俣 昇**・小堀為雄***

本論文では、専門家による橋梁評価のコンピュータ支援システムの開発について報告している。このシステムは、橋梁の安全性評価構造の決定と規定要因の選定、その規定要因による橋梁の対比較と安全性順位図の作成、およびその判別図による客観性評価の3プロセスよりなり、前二者はISM法に、後者は三群判別関数に支援されている。検証として、3名の専門家による事例と力学的評価結果との比較を行っている。

Keywords: safety evaluation of bridges, ISM, discriminant analysis

1. ま え が き

橋梁は、計画・設計・施工・供用の後、補修・補強を経て架け替えというライフ・サイクルをたどるが、現在多くの橋梁は、老朽化や環境条件の変化に伴って補修・補強のサイクル期に差しかかってきている。実際、全国で橋長15m以上の橋数は4万橋程度ある。そのうち昭和30年以前に架設された橋梁の比率は約25%あり、少なくともこれらはその対象橋となっている。そのために、限られた予算のうちで、社会的満足性を最大限に満たす適切な維持・管理計画を立案するためのシステム開発が急がれている。橋梁評価システムの研究は、その基礎となるものである。

このシステムの構築には、①多くの橋梁を比較的短期間で評価できること、②橋梁の置かれている社会的条件をも考慮した総合評価であること、③予算との関係で年度計画を策定できる順位性を備えていること、④できるだけ公平で、客観的な評価であること、などが望まれる。このような橋梁の評価システムの研究は、現在いくつか試みられているが、橋梁の力学的特性の現状の計測値ないしは推定値をもとに、橋梁の耐荷力や寿命を評価する診断法^{1)~3)}、専門家の経験的、総合的把握力を利用する診断法^{4),5)}に大別できる。

前者は、考慮される要素は比較的少ないが、各要素の意味づけや、パラメーター推定手順に、力学的理論を背景とする客観性がある。しかし多くの橋梁を評価し、順位付けするには、時間と費用を要する。一方、後者は、専門家の経験的知識を背景に、数多くの要素を総合した評価で、比較的短期間で多くの橋梁を評価し、順位付け

することも可能である。しかし、専門家の経験的知識を背景としているとはいえ、主観的な評価であることには変わりはなく、客観性の付与に努める必要がある。

両者には、このように一長一短がある。橋梁の維持・管理計画策定の緊急性、その評価の多面性を考慮するとき、両者の長所を活用した実用的なシステムの開発、たとえば経験的評価システムでまず順位付けし、問題のありそうな橋梁のみを力学的に詳しく評価するといったシステム化が考えられる。この場合でも、両者における研究の進展が望ましいことはいうまでもない。

本論文では、専門家による橋梁の経験的評価システムの客観性の向上化の工夫、そしてコンピュータ支援システムの開発について報告する。

このシステムは著者の一人が開発してきた経験的順位付けシステム^{6),7)}を援用したもので、ISM法(Interpretive Structural Modelling)に支援された橋梁の安全性規定要因の選定プロセスと、橋梁の安全性順位図の作成プロセス、および三群判別関数法に支援された順位図の客観性の評価と数値化のプロセス、の3つのサブプロセスより構成されるコンピュータ支援型のシステムである。このシステムについては、一部すでに報告^{8)~10)}しているが、2.では、まず、このシステムについて概説する。そして、3.では、このシステムの支援の下で、石川県下での24の橋梁を選定し、専門家による評価を実施した結果について報告する。ここでは、このシステムの支援の下で、主観的評価もある種の客観性を十分もち得ることを示唆する。

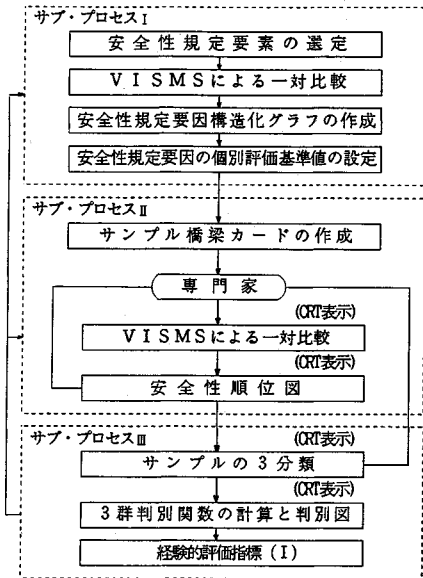
また、西村らが示唆している専門領域の違いによる評価構造の相違⁴⁾を明らかにするために、3名の専門家による適用結果の考察についても報告する。

著者らは、また、力学的な診断法として、供用耐荷力と実載荷重の比を用い、安全性の評価を行う耐荷力診断システムの実用化について検討してきた¹¹⁾。4.では、

* 正会員 金沢大学大学院自然科学研究科システム科学専攻 (〒920 金沢市小立野 2-40-20)

** 正会員 金沢大学教授 工学部基礎工学教室

*** 正会員 金沢大学教授 工学部土木建設工学科



図一 橋梁の経験的評価のシステムの基本フロー図

このシステムを概述するとともに、経験的評価システムの検証の1つとして、耐荷力診断システムによる上記24橋梁の評価との比較・分析を行う。最後に、両者の異同を明確にし、問題点がいずれにあるのか検討し、橋梁の安全性順位評価システムとしての両領域での今後の課題について整理する。

2. 専門家による橋梁の経験的評価システム

(1) 経験的評価システムの基本プロセス

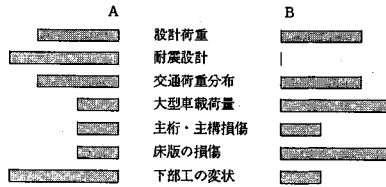
このシステムは図一の基本フローに示すように、3つのサブ・プロセスからなる。

第Iのサブ・プロセスは、橋梁の診断に際して、専門家が着目する要素の明確化を支援する。この過程は、西村らがファジイ型のISM法を用いて行っていると同様である。われわれは、むしろ、2値(有, 無)で認識した関係を、フィードバックを繰り返すことによって補完する方がより確実な認識図が得られるのではと考え、2値型のISM法を視覚型、対話型化したVISMS (Visual Interactive Structural Modelling System) による支援を採用する。順位付け対象橋梁は、それらの着目要素、すなわち橋梁の安全性規定要因の個別評価によって特徴的に記述される。表一のサンプルカードは、その例である。この要因と個別評価については、次項で述べる。

第IIのサブ・プロセスは、そのように記述された対象橋梁の順位付け評価を支援する。一般に、絶対評価より相対評価の方が容易である。このサブ・プロセスでは、まず、評価対象となるサンプル橋梁群に対して、規定要因の内容について調査し、表一に示したようなサンプルカードに整理する。そして、これをコンピュータに入

表一 サンプルカードの記入例

サンプルカード No. 1		橋種: 鋼1桁 / I 橋		橋長 l = 21.0m 幅員 w = 5.5m	
構造要因	規定要因	内 容	ランク		
I. 設計耐力	1 設計荷重	設計に使用した道路橋示方書: 大5 (II)	4		
	2 耐震設計	耐震構造の内容: 点検異常なし	4		
II. 荷重状況	3 交通荷重分布	洪水状況: 通常走行	1		
	4 大型車載荷状況	大型車交通量: 243 台/日	1		
III. 損傷(変状)状況	5 主桁・主構の損傷	異常内容: 塗装劣化	2		
	6 床版の損傷	異常内容: 局部的コンクリート剥離	4		
	7 下部工の変状	異常内容: パイルバント傾斜	4		



- A >> B 1
 - A << B 2
 - A = B 3
 - A <> B 4
- RELATION OF A, B ?

図二 一対比較画面

力することから始まる。そうすれば、図二に示すような2つの橋梁データが、CRT上に次々に表示されてくる。専門家は、この画面をみて2つの橋梁の安全性を一対比較し、メニューに従って入力していけばよい。そして結果の良否は、後述するサブ・プロセスIIIの判別図に任せ、この段階では自分の判断を信じるだけでよい。この一対比較は、コンピュータでは次のルールにより、サンプルカード2枚A, B (A=i, B=j)を対比する形で、 $n(n-1)/2$ 回行われる。ここで、 n はサンプル橋梁数である。

- ① 橋梁*i*は明らかに*j*より危険である。
 $\rightarrow d_{ij}=1, d_{ji}=0$
- ② 橋梁*j*は明らかに*i*より危険である。
 $\rightarrow d_{ji}=1, d_{ij}=0$
- ③ 橋梁*i*と*j*との安全性に差はない。
 $\rightarrow d_{ij}=d_{ji}=1$
- ④ 橋梁*i*と*j*の順番が相前後し、わからない。
 $\rightarrow d_{ij}=d_{ji}=0$

この一対比較によって、作成された2値データ行列は、ISM法のアルゴリズムによって骨格行列に変換され、すべての対象間を順位付けた橋梁安全性順位図としてCRT上に図化、表示されてくる。この順位図は、専門家の経験に裏付けされた総合的評価の結果であるが、主観的なものである。

第IIIのサブ・プロセスは、この主観的順位図の客観性

表一 橋梁診断の安全性規定要素のリスト

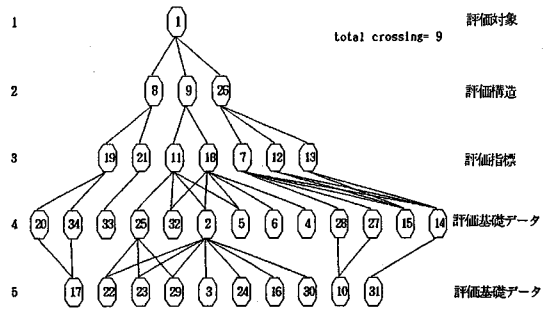
要素番号	要素名	要素番号	要素名
1	橋梁の安全性	18	設計荷重
2	架設年度	19	大型車載荷状況
3	橋種	20	超大型車
4	橋格	21	交通荷重分布状況
5	支間	22	縁端距離
6	幅員	23	バイレバント
7	下部工の変状	24	地盤の流動化
8	荷重状況	25	落橋防止構造
9	設計耐力	26	損傷(変状)状況
10	地盤の良否	27	河床洗掘
11	耐震設計	28	岩盤風化
12	床版の損傷	29	軟弱地盤
13	主桁・主樑の損傷	30	基礎工型式
14	材料劣化	31	気象条件
15	施工不良	32	地震力
16	床版厚	33	渋滞状況
17	車輪軌跡	34	大型車交通量

評価を支援する。橋梁の維持・管理計画案を作成するためには、少なくとも、直ちに維持・管理対策が必要なもの、維持・管理対策が望ましいもの、当面は必要でないもの、の三者に分類できる評価システムが必要となる。本研究では、橋梁の安全性評価順位図をもとに3分類することを旨とする。すなわち、ここでは順位図を①安全、②やや危険、③危険、という3グループに分割する。そして、この分割法に一貫した説明原理が存在するならば、主観的評価結果である順位図にも一応の客観性があると考えられる。

この検証の方法として、本システムでは3分割した橋梁群に対して、判別関数の係数を算定し、誤判別のない判別図が求められたとき、一応の客観性レベルにあるとする。そして、誤判別があれば、客観性に問題があるとして一対比較のプロセスにまで戻ることにより、客観性の高い結果を求める。この具体的方法については、(3)で説明する。

(2) 規定要因の選定と個別評価法

橋梁の安全性を規定しているおのおのの要素を、まず橋梁診断台帳などをもとに、プレーン・ストーミングにより抽出する。表一にその一覧表を示す。次に、前述したVISMSの支援のもとで、橋梁管理者などの専門家による要素間の一対比較を、要素*i*は要素*j*を規定するか、という観点より行い、階層構造図を作成する。VISMSには、階層構造図における辺の交差数を減らす要素並びを求めるアルゴリズムが組み入れられている。図一3がその結果である。ちなみに、要素を番号順に左から右へ並べた図では、辺の交差数は139個となるが、ここでは9個のみとなり、みやすい図となっている。得られた階層構造は、第1レベルに「評価対象」、第2レベルに、橋の健全性メカニズムの規定要因となる「評価



図一 橋梁診断の規定要因の構造図

構造」, 第3レベルには、観測可能な「評価指標」, そして第4レベル以下には、物理的な「評価データ」が表示されていると解釈できる。本事例では安全性評価要素を網羅している第3レベルの7つの評価指標を規定要因として採用する。

次に、評価指標である7要因について、それぞれの評価データの特性値により4ランクに個別評価内容を基準化し、ランク値が大きいほど危険となるよう分類整理したのが表一3である。ランク付けに際しては、たとえば要素番号18の「設計荷重」は、これを規定している評価データの要素である「架設年度」(道路橋示方書の改訂年度)および「橋格」の組合せにより分類する。同様に要素番号11の「耐震設計」は、評価データの要素である「地震力」(耐震設計指針の改訂年度)と、落橋防止構造(耐震補修済みの有無)により分類する。また要素番号21の「交通荷重分布状況」は「渋滞状況」の交通パターンで、要素番号19の「大型車載荷状況」は「大型車交通量」によって分類している。要素番号13, 12, 7の「主桁, 床版および下部工の変状や損傷」の程度は評価データの要素番号14, 27の材料劣化や洗掘の度合いを、文献(13), (14)を参考にしてそれぞれ4ランクに分類した¹⁰⁾。

(3) 判別関数による客観性評価法

第Ⅲのサブ・プロセスでは、主観的評価結果である順位図を3分割し、誤判別のない判別図の有無が検討される。その具体的な方法を以下に述べる^{6), 7), 18)}。

まず、順位図を適当なレベルで3つのグループに分割し

$$x_i^k: \text{グループ } G_k \text{ に属するサンプル橋梁 } i \text{ の第 } j \text{ 番目の規定要因のランク値}$$

とおけば、サンプル橋梁 *i* は

$$x_i^k = (x_i^1, \dots, x_i^k), \quad k=1, 2, 3, \quad i=1, \dots, n_k \dots (1)$$

とベクトル表示できる。ただし、*n_k* はグループ *G_k* に属するサンプル橋梁の数である。

ここで、1次判別関数

表一3 橋梁診断の安全性規定要因の個別評価基準値

要 因	基 準	ラ ン ク
1 設 計 荷 重	昭和53年以降道示・通達による1等橋	1
	昭和31年・昭和14年以降の道示・通達による1等橋	2
	昭和31年・昭和14年以降の道示・通達による2等橋及び 大正15年道組の1等橋	3
	大正15年道組による2等橋、3等橋	4
2 耐 震 設 計	昭和55年道示Ⅳにより設計又は耐震総点検による上・ 下部全て耐震補修済	1
	昭和47年道路橋耐震設計指針による設計、又は耐震総点検 により落橋防止補修済	2
	昭和31年道示による設計	3
	大正15年道組及び昭和14年道示による設計	4
3 交通荷重分布 状況	通常走行状態(交通渋滞の起こる可能性が極めて低い場合)	1
	通常渋滞状況(片側車線のみ渋滞する可能性のある場合)	2
	完全渋滞状況(全車線にわたって完全に渋滞する可能性の ある場合)	3
	常時完全渋滞状況(頻繁に完全渋滞する可能性のある場合)	4
4 大型車載荷 状況	500台/日未満	1
	500台/日以上～1000台/日未満	2
	1000台/日以上～2000台/日未満	3
	2000台/日以上	4
5 主桁・主橋の 損傷	劣化、損傷が見られない	1
	鋼橋、コンクリート橋の表面劣化が見られる	2
	欠損・さび汁・母材・溶接等のクラック及び変状・モーメ ントクラックが局部的に見られる	3
	欠損・さび汁・母材・溶接等のクラック及び変状・せん断 クラック・橋軸方向クラックが多くの部分に見られる	4
6 床版の損傷	損傷なし	1
	橋軸方向ひび割れ発生	2
	2方向ひび割れ発生・局部的なさび汁発生	3
	コンクリートの角落ち、剥離、抜け落ち、さび汁等多数発生	4
7 下部工の変状 及び損傷	損傷・変状なし	1
	かぶりコンクリートのひび割れ、剥離さび汁発生	2
	洗濯・風化によるフック露出・鉄筋のはらみ出し	3
	躯体の傾斜・沈下・移動	4

$$f_i^k = \sum_{j=1}^7 a_j^k x_{ij} + c^k, \quad k=1, 2, 3 \dots \dots \dots (2)$$

とおき、判別関数の係数、 a_j^k, c^k を求めれば、任意の橋梁は次の式により数値的に3グループに分類できる。

$$Y_{21} = \sum_{j=1}^7 (a_j^2 - a_j^1) x_{ij} + (C_2 - C_1) \dots \dots \dots (3)$$

$$Y_{32} = \sum_{j=1}^7 (a_j^3 - a_j^2) x_{ij} + (C_3 - C_2) \dots \dots \dots (4)$$

$$(Y_{13} = -(Y_{21} + Y_{32})) \dots \dots \dots (5)$$

すなわち、次項に述べる3.(1)の図一5に示したように、 Y_{21}, Y_{32} (あるいは Y_{13}) を横軸、縦軸とすれば、任意の橋梁は、式(3)、(4)を計算することによって、

- G_1 : $Y_{21} > 0$ かつ $Y_{32} > 0$ ならば、「安全」
- G_2 : $Y_{21} < 0$ かつ $Y_{32} > 0$ ならば、「やや危険」
- G_3 : $Y_{21} < 0$ かつ $Y_{32} < 0$ ならば、「危険」

というルールで3グループに分類できる¹⁸⁾。この図を判別図という¹⁹⁾。

順位図で3分割された各橋梁が、すべて判別図の当該の象限内に表示されているならば、すなわち、誤判別がなければこの順位図の3分割には、一貫して説明する数値的基準が存在することになる。式(3)、(4)の係数 $(a_j^2 - a_j^1), (a_j^3 - a_j^2)$ ($j=1, \dots, 7$) は、判別図の作成ルールよりわかるように、おのおの橋梁を安全、やや危

険、危険に識別するための重みであり、評価者が直観的に使用した評価構造を示唆するものである。ランク値の取り方と上のルールよりわかるように、具体的には負で絶対値が大きいものほど識別に際しての寄与率は大きい¹⁰⁾。

3. 専門家による橋梁の経験的評価事例と考察

(1) 支援システムの基本適用事例

本事例では、石川県で調査した100橋余りの橋梁診断台帳から、橋種、設計条件、構造および損傷度合が極力異なる24橋を選定する。選定した橋梁は鋼橋10橋、RC橋7橋、PC橋7橋であり、形式、諸元そして表一3の個別評価基準値により評価した各ランク値を表一4に示す。次にランク値の記入されたサンプルカードを入力し、図一1の第Ⅱサブ・プロセスのフローに従い、専門家による一対比較を行い、サンプル橋梁の安全性順位図を作成した。その結果を図一4に示す。この図は、2.(1)の一対比較のルールよりわかるように、下にくるほど危険となるように橋梁を配列したものとなっている。

次に、図一1の第Ⅲのサブ・プロセスのフローに従って判別関数の係数を求める作業に入る。まず、この順位図を、1～8、9～15、16～22のレベル間にある3つの橋梁グループに分割する。そして、これらの橋梁のデータを用いて、2.(3)の式(2)、の判別関数の係数、および定数を求めた。その結果を表一5に示す。この結果を用いて、式(3)、(4)を計算し、各サンプル橋梁の判別を行い、プロットしたのが図一5である。ここで、*、#、+、の各記号は、上述の順位図の3分割でそれぞれ G_1 「安全」、 G_2 「やや危険」、 G_3 「危険」グループに属していたことを示している。すなわち、これら記号が混在することなく、それぞれ第1、第2、第3象限にプロットされていれば、誤判別なしの分割であるということになる。図一5よりわかるように、図一4の順位図の3分割は、誤判別なしとなっており、表一5の係数は、それを説明する一貫した基準ということになる。実際は、順位図をみて適当なところで3分割してみる。そして判別図が求まった段階でどの橋梁が問題かを調べ、再分割していく。もし順位図が適切であれば、3回程度の試行で誤判別のない分割が求まる。

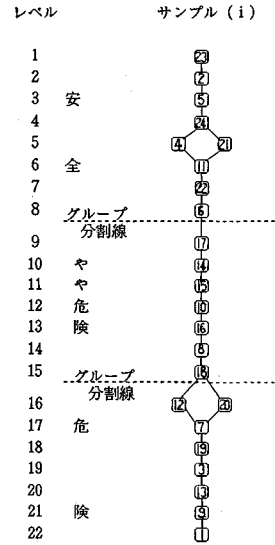
(2) 専門家による経験的評価の比較

西村らの研究では、橋梁の評価に際して、どの要因を重視するかは、評価主体の経験や専門分野によって違うことが報告されている。そこでこの点を数値的に明らかにするために、3人の専門家(A:橋梁研究者(経験年数19年)、B:橋梁コンサルタント(同30年)、C:橋梁管理者(同22年))により同一サンプルに対する安全性順位図および判別係数の算出と比較を試みた。

a) 3人の専門家の安全性順位図の比較

表—4 サンプル橋梁の特性および個別評価基準によるランク値表

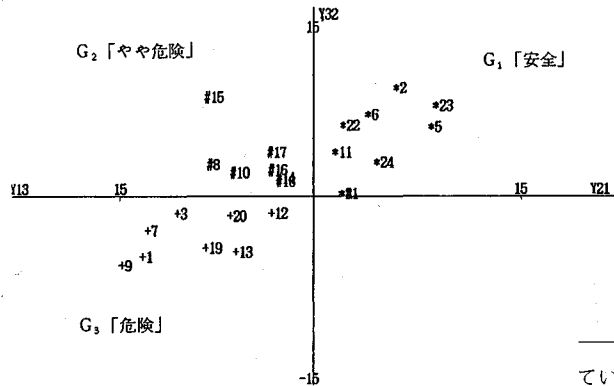
橋名 (No)	橋種	橋長 (m)	幅員 (m)	架設 年度	各安全性規定要因のランク値						
					1	2	3	4	5	6	7
1	鋼1桁	21.0	5.5	S9	4	4	1	1	2	4	4
2	鋼1桁	22.1	5.1	S6	4	4	1	1	2	1	1
3	鋼板桁	20.5	5.5	S10	2	4	2	4	4	1	1
4	ウレトス	218.5	6.5	S29	2	1	2	3	3	3	1
5	鋼板桁	19.2	6.0	S30	2	3	2	3	1	3	1
6	ウレトス	390.6	6.0	S28	2	4	1	1	3	3	1
7	鋼板桁 吊橋	76.8	7.2	S10	2	2	2	1	3	3	4
8	鋼1桁	34.5	4.5	S18	4	4	1	1	3	2	3
9	RCT桁	17.0	6.8	S7	4	4	2	2	4	3	2
10	RCTマン	15.0	5.5	S18	4	4	2	1	3	1	2
11	PCスラブ	7.3	7.3	S38	1	3	1	1	3	3	2
12	RCT桁	17.0	6.5	S38	1	1	1	1	4	4	1
13	RCT桁	21.4	7.8	S11	2	1	3	3	4	4	2
14	RCT桁	25.2	7.5	S26	2	1	3	3	4	4	1
15	RCTマン	99.7	5.2	S30	2	4	2	1	3	3	2
16	RCT桁	73.5	4.6	S10	4	4	2	1	3	2	2
17	PCアレン	25.7	6.0	S29	4	2	1	2	3	1	2
18	PCスラブ	93.0	12.0	S50	1	1	1	1	4	3	2
19	PCスラブ	18.0	6.0	S35	1	1	1	2	4	4	3
20	PCアレン	60.0	13.0	S47	1	1	1	2	4	3	2
21	PCアレン	126.5	9.3	S34	2	1	2	3	3	3	4
22	PCスラブ	53.0	6.0	S31	2	1	1	1	4	3	1
23	ウレトス	400.0	7.2	T7	2	1	2	3	1	1	1
24	鋼アチ	82.0	6.0	S40	2	1	1	2	3	3	1



図—4 サンプル橋梁の安全性順位表

表—5 判別関数の係数表

安全性規定要因	$a_1^3 - a_1^2$	$a_1^2 - a_1^1$
1 設計荷重	-2.724	-0.630
2 耐震設計	0.373	-1.085
3 交通荷重分布	0.264	-0.271
4 大型車交通量	-2.879	-2.563
5 主桁・主橋の損傷	-2.408	-4.721
6 床版の損傷	-2.618	-0.588
7 下部工の変状及び損傷	-2.041	-5.942
定数	30.647	31.429



図—5 橋梁の安全性の三群判別図

図—6 に 3 人の専門家によるサンプル橋梁の安全順位図を示す。これを比較すると

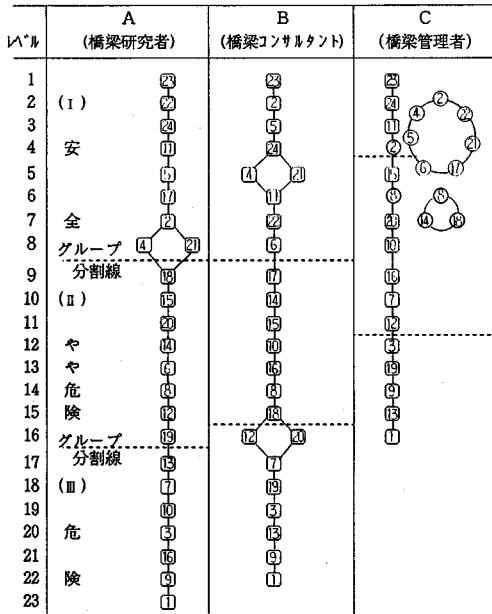
- ① A, B は、ほぼすべての橋梁間で順位評価が成立しているが、C で図の右方にサイクルとして示されている部分については、順位評価が不十分となっている。
- ② 3 つの順位図で、順位が 4 レベル以上移動するものはなく、その意味では大きな評価差はない。
- ③ 詳しくみると、それぞれの専門的な立場が反映されている。すなわち、下方の危険グループに着目すると、A は構造的に不安定な橋を、B は A の評価に加えて損傷の甚だしい塩害橋梁を危険グループに取り込んでいた。また、C は上・下部工の損傷について強く意識し、特に床版の損傷の大きい橋梁に絞り込んだとらえ方をし

ていた。

b) 判別係数表と係数の重要度比較

3 人の専門家の評価構造の相違は、判別係数を比較することにより数値的に考察することができる。表—6 に図—6 の順位図を 3 分割したときの係数を示す。ちなみに、このときの分割は、どれもが誤判別なしとなっている。

① $(a_1^3 - a_1^2)$ は、前述したように危険橋梁とやや危険橋梁を分類するときの、各規定要因の重みを示唆していると解釈できる。まずこれに着目すると、A は設計荷重および交通荷重分布の要因の係数が負で絶対値が大きく、設計面から主構造の安全性評価を強く意識していることがわかる。また、B の係数値は均衡した値を示しており、7 つの安全性規定要因に等しく目配りしているといえよう。C は大型車交通量と床版の損傷に重点があり、橋梁管理者として、床版の損傷状況が現場でい



図—6 3人の専門家の安全性順位図

表—6 3人の専門家による係数比較表

安全性判定項目	$a_1^2 - a_2^1$			$a_1^3 - a_2^2$		
	A	B	C	A	B	C
1. 設計荷重	-1.249	-0.630	-0.153	-11.245	-2.724	-3.111
2. 耐震設計	-2.465	-1.085	-1.522	-1.954	0.373	-1.220
3. 交通荷重分布	-5.611	-0.271	-1.967	-13.487	0.264	-0.279
4. 大型車交通量	-1.828	-2.563	-1.769	-2.430	-2.379	-4.097
5. 主桁・主橋の損傷	-4.996	-4.721	-4.329	-6.990	-2.408	-2.807
6. 床版の損傷	-2.786	-0.588	-1.010	-4.625	-2.618	-3.042
7. 下部工の変状及び損傷	-3.869	-5.942	-4.874	-4.517	-2.041	-1.216
定数	45.850	31.429	34.742	108.430	30.647	40.296

全]、「やや危険」、「危険」と区分する耐価力診断システムを提案した¹¹⁾。それは、鋼橋、コンクリート橋の主桁の耐荷力 P_1 (ただし、鋼橋は P_m 、コンクリート橋は P_c としている) と主桁の実載荷重 Q_1 、および、床版の耐荷力 P_2 と床版の実載荷重 Q_2 との、それぞれの耐荷率 F_1, F_2 の判別領域を、図—8 のように区分したものである。また、下部工については安全性の判定指標 S を、上部工と同じように3つにランク分けを行う。そのランク付けは、安定計算と耐荷力計算を基本に、「安全」、「地震時で不安定」、「常時で不安定」として区分している。

ここでも同様に、3. の評価で使用したサンプル 24 橋について、以上のフローに従い、 P, Q に関しては以下のモデル式を用いて評価値を算定した。

① 主桁の耐荷力 (P_1 tf : P_m, P_c)^{15), 16)}

$$P_m(\text{鋼橋}) = 20 \times \frac{\sigma_s - \sigma_d}{\sigma_{20}} \times k_s \times k_r \dots \dots \dots (6)$$

ただし、 σ_s : 材料の許容応力度 (kgf/cm²)
 σ_d : 死荷重応力度 (kgf/cm²)
 σ_{20} : TL-20 による応力度 (kgf/cm²)
 k_s, k_r : 応力度、路面状況に関する係数

$$P_c(\text{コンクリート橋}) = 20 \times \frac{f}{\beta} \cdot \frac{M_u - 1.1M_d}{M_l} \dots \dots \dots (7)$$

ただし、 M_u : 主桁の曲げ破壊抵抗モーメント (tf·m)
 M_d : 現在の死荷重による曲げモーメント (tf·m)
 M_l : TL-20 による曲げモーメント (tf·m)
 f : 実測・計算応力度比
 β : その橋に必要な TL-20 に対する破壊安全率

② 床版の耐荷力 (P_2 tf)

$$P_2(\text{床版}) = P_s \times C_1 \times C_2 \dots \dots \dots (8)$$

ただし、 P_s : 現行示方書での換算 T 値¹¹⁾

ちばん最初に目につき、それを実感として大きく感じとっていると同時に、その因果関係を大型車交通量との関係としてとらえて、判断していると推測できる。

② ($a_j^i - a_j^i$) は、安全橋梁とやや危険橋梁を識別する係数となる。安全側の評価では、差異はあまり大きくない。いずれも損傷の有無に目がいつている。

③ A, B, C とも耐震設計に対する係数は比較的負の小さい値となっている。これは3人の専門家が有感地震回数之最も少ない石川県の在住者であり、サンプル橋梁も石川県の橋梁であることを考えると、このことは地域性の反映とも考えられる。

上述したように、この支援システムの下で主観的评价にもある種の客観性を付与することができる。それは個人ないしはグループで、安定した内部矛盾のない順位評価が得られるという意味である。そこで、次にこのシステムの支援の下で得られた評価と力学的特性の評価結果との検討をさらに試みることにした。

4. 耐荷力診断結果による考察

(1) 耐荷力診断システムの基本フロー

図—7に橋梁の耐荷力診断システムの基本フローを示す。耐荷力診断システムは厳密計算法ではないため、パラメーター設定の信頼性や、グループ評価の境界線設定の妥当性に問題があるものの、工学的で簡便かつ実務的な利点をもっている。著者らは上部工の工学的評価法として、現在利用されている耐荷力算定式を一部改変したもので、供用耐荷力 P と実載荷重 (交通荷重) Q を個別に算定し、耐荷率 $F = P/Q$ を求め、 F の値により、「安

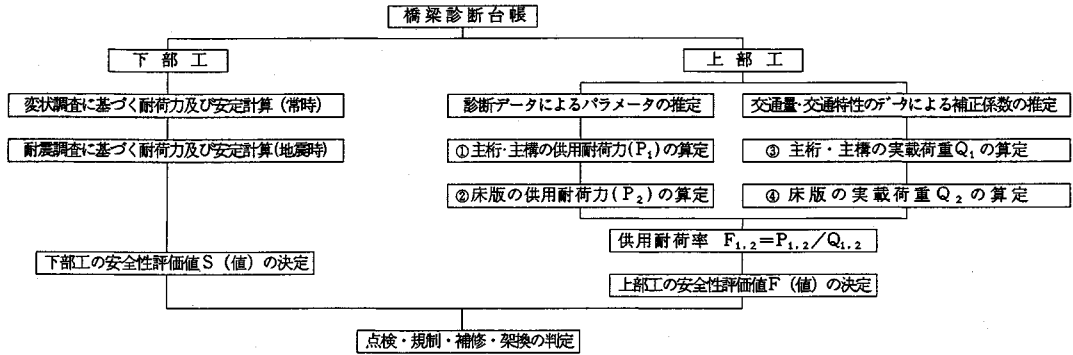


図-7 橋梁の耐力力診断基本フロー図

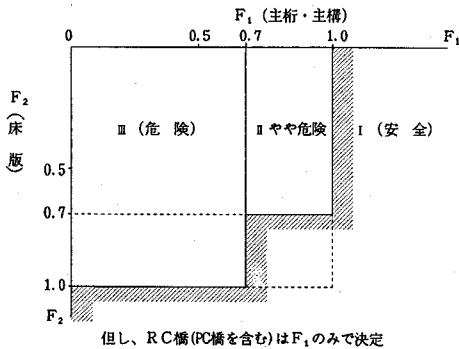


図-8 F値による判別領域図

した経験的評価結果による分類で、ここでは一応Bの結果を用いる。これらの結果をまとめたものが図-9で、 F, S 値のクリティカルな値で上・下部工の安全性評価を3分割している。この図の見方は、左上端にRC10(II)とあるものについて説明すると、第10番目の橋はRC橋で、 F, S 値の判定ではともに安全であるが、経験的評価結果ではII、すなわち、やや危険と判定されていることを示している。

まず、全体としては、 F, S, I 値の3つの評価値の一致率は33%で、 F 値と I 値では46%、 S 値と I 値では63%という結果になっている。次に橋種別にみると、鋼橋については F 値と I 値の一致率は80%、プレストレスト・コンクリート橋を含む鉄筋コンクリート橋(以下PC橋およびRC橋と称す)については21%となっている。また危険ランクの橋に着目すると、図-9の耐力力診断システムで「危険」と診断された5橋が、すべて I 値でも「危険」グループに属しており、経験的評価システムの危険に対する判定評価との整合性が確認された。

耐力力診断システムで「やや危険」と判定された6橋の中で、2つの橋は経験的評価では安全とされている。逆に、「安全」と判定された13橋の中で、1橋が経験的評価では危険、5橋が「やや危険」としている。これら不整合の橋は、鋼橋1橋を除いて7橋がPC橋を含むRC橋である。そこで、これらのコンクリート橋について、双方の評価プロセスを考察すると、次のような問題点が指摘できる。

① コンクリート橋の耐力力評価過程で、応力度比や推定鉄筋量のばらつき、損傷評価および破壊安全率 β の取り方にまだ検討の余地があると思われる。

② 経験的評価システムで、コンクリート橋の一致率が低下しているのは、損傷が甚だしい老朽橋について、その直観的および視覚的なインパクトが、専門家の判断をより危険側に導いているものと思われる。これは、ひびわれを許容しているRC橋や一部PC橋に対し、使

C_1, C_2 : 荷重および劣化による損傷係数¹¹⁾

③ 主桁の実載荷重 (Q_1 tf)

$$Q_1 = 20 \times \frac{1}{K_{1w} \times K_{1t}} \dots \dots \dots (9)$$

ただし、 K_{1w}, K_{1t} は荷重分布に関する補正係数¹¹⁾

④ 床版の実載荷重 (Q_2 tf)

$$Q_2 = 20 \times \frac{T_w}{8} \times e \dots \dots \dots (10)$$

ただし、 T_w : 最大輪荷重¹¹⁾

e : 車輪の軌跡による補正係数¹¹⁾

ただし、耐力力算定の前提条件として、式(6)、(7)の鋼橋およびコンクリート橋のパラメーターと係数は文献13)、14)を引用し、断面欠損率については0~30%の範囲で各パラメーターの計算を行った。特にコンクリート橋の実測・計算応力度比 f はすべて1.4とし、破壊安全率 β は2.10~2.50の範囲で評価した¹⁵⁾。また、式(8)、(9)、(10)は文献13)を引用し、床版の耐力力計算を行っている。

(2) 経験的評価結果との比較

表-7の評価値の F の欄は、ここで得られた F 値を図-8の基準で分類したものである。 S の欄は図-7のフローによる判定結果である。最後の I の欄は、先に報告

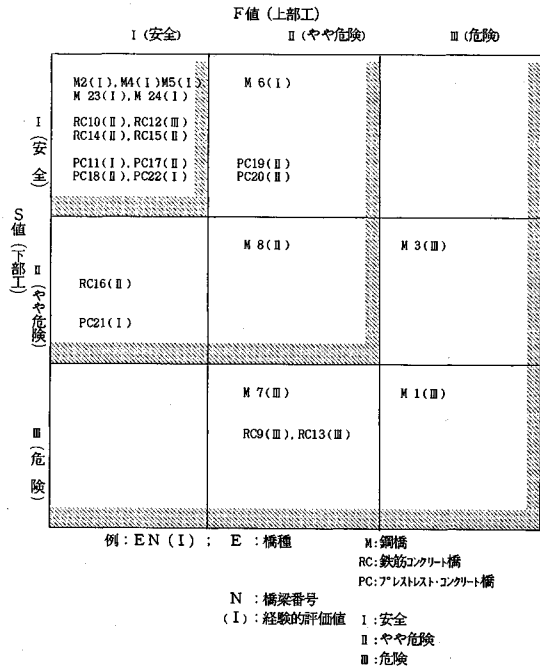
表一 7 サンプル橋梁評価結果

橋名 (No)	橋種	耐荷力計算値				耐荷率		評価値		
		P ₁	P ₂	Q ₁	Q ₂	F ₁	F ₂	F	S	I
1	鋼 I 桁	4.2	7.6	9.1	20.8	0.46	0.37	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
2	鋼 I 桁	46.2	9.1	10.7	12.5	4.32	0.73	I	I	I
3	鋼板桁	10.0	12.4	16.6	15.6	0.60	0.73	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ
4	ワレトラス	33.8	15.6	9.6	15.6	3.52	1.00	I	I	I
5	鋼板桁	20.0	17.4	16.7	20.0	1.20	0.87	I	I	I
6	ワレトラス	15.7	10.8	5.8	20.8	2.71	0.46	Ⅱ	I	I
7	鋼板桁 ゲルバー	17.4	9.1	14.0	10.0	1.24	0.91	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ
8	鋼 I 桁	9.5	11.9	11.4	12.5	0.83	0.95	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
9	RCT 桁	14.3		18.2		0.78		Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ
10	RC 梁	19.4		9.1		2.13		I	I	Ⅱ
11	PC 777	P ₁ > 20		Q ₁ < 20		F ₁ > 1.0		I	I	I
12	RCT 桁	41.6		16.5		2.52		I	I	Ⅲ
13	RCT 桁	14.6		15.2		0.96		Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ
14	RCT 桁	20.6		15.2		1.36		I	I	Ⅱ
15	RCT 777	16.2		9.3		1.74		I	I	Ⅱ
16	RCT 桁	15.4		10.1		1.52		I	Ⅱ	Ⅱ
17	PC 777	P ₁ > 20		Q ₁ < 20		F ₁ > 1.0		I	Ⅱ	Ⅱ
18	PC 777	15.1		13.0		1.16		I	I	Ⅱ
19	PC 777	12.0		13.6		0.88		Ⅱ	I	Ⅲ
20	PC 777	9.6		13.5		0.71		Ⅱ	I	Ⅲ
21	PC 777	P ₁ > 20		Q ₁ < 20		F ₁ > 1.0		I	Ⅱ	I
22	PC 777	P ₁ > 20		Q ₁ < 20		F ₁ > 1.0		I	I	I
23	ワレトラス	20.0	11.3	10.1	15.6	1.98	0.72	I	I	I
24	鋼 777	P ₁ > 20	15.7	Q ₁ < 20	20.8	F ₁ > 1.0	0.75	I	I	I

ただし、① 耐荷率のうち鉄筋コンクリート橋(含PC橋)は主桁の P₁, Q₁ について算定している。
 ② S31年以降架設のPC橋及び鋼アーチ橋のうち健全なもの、評価値Fは1とした。

用限界状態を終局限界状態と同一レベルで直観的判断を下していることが原因と考えられる。

①, ②の顕著な例として、国道に架かる No.12 橋は、橋長が 17 m の比較的スパンの長い単純 RCT 桁で、設計上桁有効高が 1.6 m と比較的大きい橋である。主桁に荷重や塩害でせん断および曲げクラックや、さび汁が発生しているが、計算上鉄筋欠損率を 20% 考慮しても、耐荷力は十分確保され、耐荷力診断システムでは「安全」と評価されている。また、今回のコンクリート橋の耐荷力計算の f 値 (計算値/実測値) は簡便法の 1.4 を使用しており、載荷試験を考慮すると、さらに耐荷力が一般的に増す傾向にある。これは耐荷力計算式 (7) での破壊抵抗曲げモーメント M_u には、桁高が大きく効いており、また桁底部のさび汁やせん断および曲げクラックの影響の、定量的な σ_{ck} の低減評価に問題点が残されると推測される。これには浅沼らが提案している¹⁷⁾ たわみ特性による耐荷力算定で、曲げ剛性 (EI) 等によ



図一 9 耐荷力診断システムによる 3 グループ分類図

りびわれ深さ ΔS を推定し、有効断面を決定する手法の確立・援用が必要となる。

以上は、3 人の専門家のうち B の結果について問題点を整理したが、A, C も同様に図-6 の結果を図-9 に適用すると、図-9 の「安全」にランクされた PC および RC 橋の 8 橋の中で、I 値では「やや危険」の橋梁が半分以上存在していた。したがって、経験的評価システムでは、専門領域を超えてコンクリート橋に対する安全性に対する評価が厳しい結果となっている。

これらの結果を考え合わせると、経験的評価システムの適用に際して、主桁の損傷の個別評価法については、さらに検討する必要があるといえよう。この問題については、耐荷力診断システムにも、コンクリート橋の耐荷力計算モデル式 (7) には、M_u や β などとその評価プロセスでの困難性から、不確実性が依然として存在しており、この方面からの検討も必要となるだろう。

5. あとがき

本研究では橋梁の維持・管理順位評価システムを策定するために、3つのプロセス・システムからなる経験的評価システムを構築し、その適用研究を試みるとともに、力学的な耐荷力診断システムによる評価結果との比較検討を行った。その結果得られた知見をまとめると以下のとおりである。

(1) 提案した支援システムの下では、経験的評価にも一定の客観性を付与することができる。

(2) 専門家の診断にも個人差があるが、その違いは数値的に明らかにできる。その結果をもとに討論することにより、複数の専門家による判断を総合化し得る可能性がある。

(3) 危険橋梁の識別に関しては、経験的評価結果と力学的な耐荷力評価結果との間で整合性があり、多数の橋梁の一次評価としては十分に使用できる。

もちろん、まだまだ検討、工夫を必要とする課題がいくつかある。それらを整理すると、

- ① 要因の選定とランク値の設定
- ② 一対比較の対象となるサンプル橋梁の数とその構成
- ③ 評価主体の人数とその専門領域構成
などが経験的評価システムにおける基本的な課題である。さらに、システム全体としては、
- ④ 評価主体間での合意形成
- ⑤ コンクリート橋のひびわれ評価など、2評価システム間での整合化

なども課題である。

最後に、このシステムの特徴に触れておきたい。このシステムの特徴は、要因の選定から橋梁の順位付けに至る全プロセスの明示性と、結果の判別関数による評価とそのフィードバックにある。したがって、人々は各プロセスについて具体的に異議を提示することが可能であり、システム側も常にそれらの意見をフィードバックし得る状態にある。われわれは特に上記の課題に対して専門家各位からのご意見を拝聴して、より普遍性のある評価システムを構成したいと考えている。

また、本システムを上部工、下部工、床版など、橋の構造を各部位に区分し適用することや、維持・管理計画の代替案作成への利用についても検討したいと考えている。

参考文献

- 1) 小堀為雄・城戸隆良・本田秀行・出村禧典・石見聖吉：ワーレントラス橋（御影大橋）の耐用性調査の一例，橋梁と基礎，Vol.17, pp.46~51, 1983.4.
- 2) 西川和廣：既設道路橋の被劣に対する耐荷力判定の試み，第16回日本道路会議特定課題論文集，pp.285~287, 1985.10.
- 3) 西村 昭・藤井 学・宮本文穂・加賀山泰一：橋梁の損傷評価における力学的挙動の有効性，土木学会論文集，第380号，pp.355~364, 1987.4.
- 4) 西村 昭・藤井 学・宮本文穂・梶谷義昭・春名真義：既設橋梁の耐荷力評価とその検証に関する研究（上），（下），橋梁と基礎，Vol.21, pp.8~51, 1987.2, pp.34~39, 1987.3.
- 5) 西村 昭・藤井 学・宮本文穂・小笠 勝：構造物の健全度診断へのファジィ集合論の適用に関する基礎的研究，土木学会論文集，第380号，I-7, pp.365~374, 1987.4.
- 6) 木俣 昇：ISM法に支援された大地震時避難路の安全性評価システムに関する基礎的研究，JORSJ, Vol.28-1, pp.31~50, 1985.3.
- 7) 木俣 昇：除雪路の順位決定のための参加型システムに関する基礎的研究，土木計画学研究論文集，第3号，pp.57~64, 1986.1.
- 8) 木俣 昇：地震時緊急路網の整備計画に関する基礎的研究，土木計画学研究論文集，第7号，pp.75~82, 1989.12.
- 9) 木俣 昇・沢田茂善・小間井孝吉：橋梁の間主観的診断システム，第18回日本道路会議特定課題論文集，pp.223~235, 1989.10.
- 10) 小堀為雄・木俣 昇・小間井孝吉・竹村 哲：専門家による橋梁診断の支援コンピュータ・システムに関する研究，橋梁と基礎，Vol.24, pp.45~50, 1990.11.
- 11) 永井重光・太田 実・小間井孝吉：実耐荷力判定への橋梁診断，第16回日本道路会議特定課題論文集，pp.240~241, 1985.10.
- 12) John N. Warfield: Binary Matrices in System Modeling, IEEE, Vol.1 SMC-3, No.5, pp.365~374, 1973.
- 13) 日本道路協会，道路橋補修便覧，pp.26~31, 1979.2.
- 14) 国鉄のランク基準：部材の変形・欠損亀裂状況による判定，橋梁と基礎，pp.56~65, 1974.10.
- 15) 日本道路協会橋梁委員会：鋼道路橋（プレートガーダー橋およびトラス橋）供用荷重算定指針（案），1970.10.
- 16) 建設省土木研究所：コンクリート橋の耐荷力に関する調査研究，土木研究所資料第1228号，1977.11.
- 17) 浅沼秀弥・佐々木道夫・至墮利夫：たわみと固有振動数の測定によるRCT桁橋の耐荷力の判定，第16回日本道路会議特定課題論文集，pp.276~279, 1985.10.
- 18) 奥野忠一ほか：多変量解析法，日科技連，pp.259~313, 1971.

(1990.6.27・受付)

A FUNDAMENTAL STUDY ON EVALUATING SYSTEM OF BRIDGES FOR MAINTENANCE AND CONTROL PLANNING

Koukichi KOMAI, Noboru KIMATA and Tameo KOBORI

This paper presents a supporting system for evaluation of the safety of bridges by maintenance engineers. The system consists of three subprocesses : On the first, the dominant factors for evaluating the safety of bridges are determined using the hierarchical diagraph developed by ISM. On the second, pair-wise comparisons of bridges characterized with the factors are done by maintenance experts, and a safety-order-diagram is drawn automatically by the supporting system. On the third, through the discriminant analysis of the diagram bridges are numerically classified into three categories ; safety, a slightly danger and danger.

We do experiments on evaluation of 24 bridges by three experts of different professional background and also make comparison between the results gotten by this system and the ones by the physical evaluation of dynamic characteristics of bridges.
