

(6) 数量化理論の構造物の健全度評価への応用

京都大学工学部 白石 成人

京都大学工学部 古田 均

京都大学大学院 ○杉本 雅一

1. まえがき

我国において橋梁が永久構造物として建造されたのは明治時代からであり、近代橋梁が本格的に建設されたのは1950年代からである。これ以後現在まで30年の間に、構造解析法、設計荷重の評価、材料の開発、構造設計法などに関して、多くの研究がなされてきている。しかし、橋梁を通過する大型交通量は増加の一途をたどり、一方、橋梁を構成する材料には経年的な変化がみられるようになってきている。これらは橋梁の安全性を低下させ、さらには将来の事故を誘発させる引金ともなりうる。事実、我国では現存する10万程の橋梁のうち、約1万橋が何らかの形で損傷を受けているといわれている。しかし、これらすべてを架替えるには莫大な費用が必要であるので、いかにこれらを補修・補強しその構造安全性を保持していくかが極めて重大な課題となっている。

橋梁の維持管理を考える上で、既存の構造物の健全度を評価し、将来の耐用期間を推定することは急務であるにもかかわらず、必ずしも十分な研究がされておらず、チェックリストなどに基づいて簡単な調査等が行なわれているにすぎない。構造物の健全度評価を困難としている原因は有用なデータを十分に得ることの難しさもあるが、健全度が多岐に亘る数多くの要因をもとに総合的な形で評価されねばならず、単純な力学モデルを用いて適確な判定を下すことが不可能な点にある。

以上のような観点から、本研究では種々の異なる性質をもつ有用な情報をいかに健全度評価に反映させるかについて検討を加える。一般に、損傷度評価に利用できる情報としては、振動あるいは載荷試験によって固有振動数あるいは減衰定数の変化を測定した結果、変位・応力等の計測結果、非破壊検査による結果などが考えられるが、最も容易に利用できるものは視察および調査によるデータである。本研究では、この腐食・クラックの有無などの視察によって得られる情報をいかに健全度評価に導入すべきかについて考究する。これらのデータの質の違いおよび量の不十分さとその評価メカニズムの複雑さを勘案して、健全度評価システムを1つの社会システムに模し、数量化理論を利用することを考える。まず、この視察に基づく外観的評価法の位置付けを明らかにし、橋梁構造物の外観的評価法に必要な項目を挙げる。次に、これらをチェックリストの形で各アイテムに対するデータとして整理し、数量化理論第Ⅱ類を用いて各カテゴリーに妥当な数値を与え、これに基づいて各橋梁から得られたデータを評価し、橋梁の健全度の分類を行なうことを試みる。

2. 健全度評価の手順¹⁾

既存構造物のある時刻 t における信頼性は次式のような信頼性関数によって概念的に評価される。

$$L(t) = L(t_0) \exp \left[- \int_{t_0}^t h(\tau) d\tau \right] \quad (1)$$

ここに、 t_0 は現在注目している時刻であり、 $L(t)$ 、 $R(t)$ は信頼性関数、危険関数である。

この $L(t_0)$ を評価するのが健全度評価であり、 $\exp\left[-\int_{t_0}^t R(\tau) d\tau\right]$ を評価するのが余寿命の推定に結びつく。健全度を評価するには、(a)設計計算書や設計図を検討する、(b)準拠した設計示方書を検討する、(c)新たに得られたデータを用いてその構造物の解析を行なう、などの解析的な方法と、(d)破壊位置を決定する、(e)非破壊検査を行なう、(f)欠陥部分を探索する、(g)保証強度試験を行なう、などの実験的な方法がある²⁾。しかしながら、実際にはこれらの実験的な検査法を全ての構造物に対して行なうことは不可能であり、視察によって各項目の検討を行ない、不明な箇所については写真撮影などを行ない専門家の判断をあおぎ、さらに重要な橋については振動試験を行なうことが实际的であろう。以上のことを考慮して得られた橋梁の健全度評価の手順の一例を図1に示す。

3. 橋梁構造物の健全度評価に関する評価項目

橋梁構造物の健全度の外観的評価法に必要な項目として、橋梁全体に関する変位、移動・沈下、座屈、振動などが考えられ、局部に関するゆるみ、ずれ、ひびわれ、切断、発錆、腐食などが挙げられる。現在までの実態調査による結果から比較的問題点があったと報告されている箇所に注目して選定した調査検討項目を以下に示す³⁾。ただし、これらの項目は鋼橋に対して考えられている。

I. 橋面構造

(A)舗装

①路面の凹凸(段差、わだち揺れを含む。) ②ひびわれ、ひらき ③フレッティング⁴⁾、すべり、etc

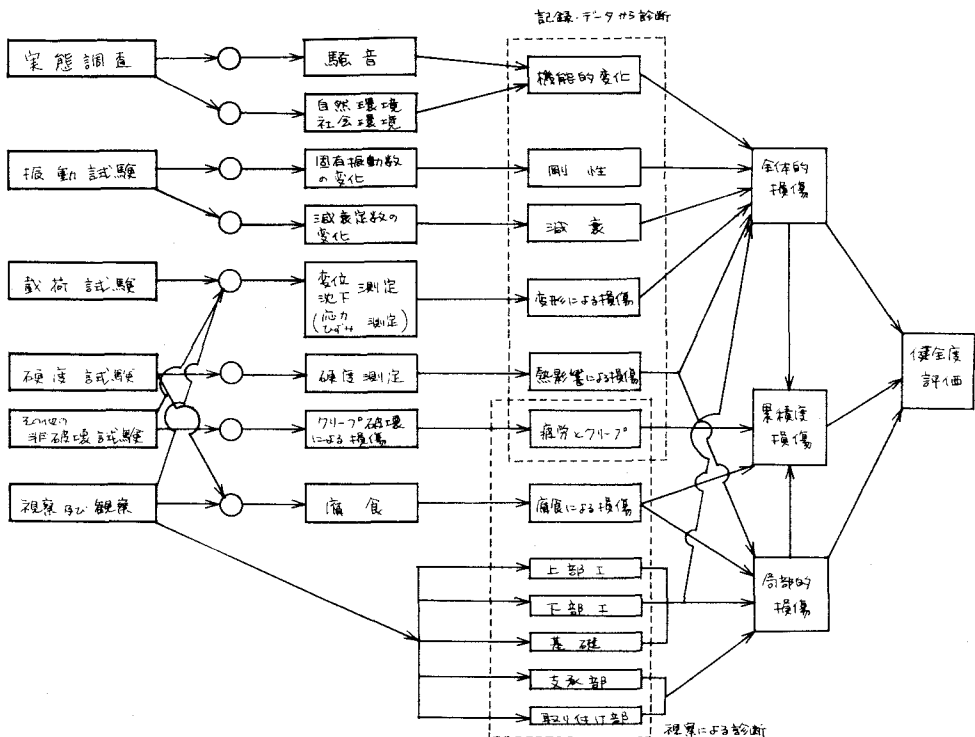


図1. 橋梁の健全度評価システム

(B)伸縮装置

- ①伸縮装置あるいは舗装と後打ち材との凹凸
- ⑤漏水 ⑥後打ち材の損傷(表面剥離など)
- ⑦アンカー及び取付けボルトの欠損
- ⑧異常伸縮

(C)排水施設

- ・排水ます
 - ①蓋の異常 ⑨沈泥ますの異常
 - ⑩ます本体の破損 ⑫滞水
- ・排水管
 - ③管の破損 ⑭滞水 ⑮施工、部品の不良
- ・横断排水溝
 - ⑥蓋の異常 ⑰本体の異常、破損 ⑱堆泥

II. 橋体構造

(A)塗装

- ⑦変色 ⑲塗膜の剥離など

(B)鋼構造

- ・主げた、主構
 - ②中、下路橋の変形
 - ②街路上のけた下フランジの変形
 - ③支承部ソールプレートの変形、ひびわれ

- ②4対傾構とけたとの取合部の変形

- ②5水はけの悪い箇所、腐食、箱げた内部の滞水
- ・縦、横桁など
 - ②6縦桁の損傷 ②7横桁の損傷 ②8対傾構の損傷
- ・下部構造
 - ②9街路上橋脚、支柱の変形
 - ③0箱断面橋脚内部の水溜
 - ③1基礎構造の変状に伴う沈下、移動、傾斜
- ・接合、継手部
 - ③2リベットの腐食による損耗
- ・支承
 - ③3移動量の余裕不足やそれによる変形、ひびわれ
 - ③4アンカーボルト、セッットボルトのゆるみ
 - ③5支承板、ローラーなどの錆つき
 - ③6杏座の沈下、圧壊 ③7ごみ、泥詰り
- ・付属設備、その他
 - ③8落橋防止装置の移動量の余裕不足
 - ③9高欄の変形

(C)コンクリート床版

- ④0ひびわれ ④1剝離(剥落) ④2鉄筋露出
- ④3漏水 ④4劣化 ④5空洞および豆板

4. 数量化理論の健全度評価への応用

本研究では、健全度評価に数量化理論第Ⅱ類を用いる。数量化理論第Ⅱ類は、質的データの判別、予測分析のための方法論である。⁹⁾すなわち、外的基準が分類(グループ)で与えられているとき、同じ外的基準に属するケースは相互に近い値を、異なるグループに属するケースは互いに離れた値をとるように、一組の定性的変数を総合化した判別得点を求める方法である。この場合、判別効果の測度として相関比を考え、これが最大になるように個々の変数のカテゴリを数量化する。このとき、判別のためのケース得点 Y_i は次のように書ける。

$$Y_i = \sum_j \sum_k \delta_i(jk) x_{jk} \quad (j=1, 2, \dots, r; k=1, 2, \dots, t_j) \quad (2)$$

ただし、 $\delta_i(jk) = \begin{cases} 1 & \dots \text{ケース } i \text{ がアイテム } j \text{ のカテゴリ } k \text{ に該当するとき} \\ 0 & \dots \text{そうでないとき} \end{cases}$

ここに、 r は総アイテム数、 t_j はアイテム j におけるカテゴリ数である。

この数量化理論第Ⅱ類を橋梁の健全度評価に用いることを考える。数量化理論では、まずアイテムカテゴリ表を作成することから始めなければならない。いま、耐震性調査を行うことにより表1の

結果が得られたとする。このような橋梁の変状調査においては、調査項目として①橋梁名、②道路及び河川名、③架設地点、④橋長・幅員、⑤構造形式、⑥架設年月日、⑦設計示方書、⑧視察による所見、⑨設計資料の有無、⑩ボーリング柱状図、⑪架設地点の震度階、⑫地盤の痕状化、などがとられることが多い。この内、視察の対象として、上部構造、支承部、下部構造、取り付け部に注目する。いま、アイテム1～9を以下のようにカテゴリー化する。

1. 上部構造としては主として床版に注目し、損傷のある場合は△、特にひどい場合は×、損傷のない場合は○とする。
2. 支承部も重要欠陥は×、損傷があれば△、損傷がなければ○とする。
3. 下部構造も同様に損傷度を分類する。
4. 取り付け部の場合は、欠陥（クラック等）があれば×で表わし、欠陥のない場合は○とする。
5. 地盤状態に関しては、N値で分類している。例えば、N値が25以上になる深さが20m以上のときD、10～19mのときC、0～9mのときB、調査資料がなければAと表わす。
6. 痕状化は難易度Ⅰ～Ⅴで表わす。（数字が小さいほど危険）
7. 地盤沈下については、橋脚・橋台が明らかに沈下している場合は×で表わす。
8. 架設年については昭和2ケタ、1ケタ、大正をA、B、Cとする。
9. 設計示方書についてはAが不明、Bが昭和3年のもの、Cが昭和14年のものを表わす。

いま、調査の結果、各橋梁の健全度が次の5ランクに分類されたとする。（表1右端）

橋梁 No.	1			2			3			4			5					6			7			8			9			健全度 ランク		
	上部構造			支承部			下部構造			取り付け部			地盤					液状化			沈下			架設年			設計示方書					
	N>25の 深さ																															
	O	△	×	-	O	△	×	O	△	×	O	△	×	A	B	C	D	V	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	O	△	×	A	B	C	A	B		C	
1	✓			✓				✓			✓					✓				✓	✓			✓							✓	B
2		✓				✓					✓								✓			✓		✓		✓	✓					E
3	✓			✓					✓			✓				✓				✓												B
4		✓				✓				✓			✓							✓			✓		✓		✓	✓				E
5	✓				✓			✓			✓		✓							✓			✓		✓		✓					B
6	✓					✓				✓		✓							✓				✓		✓		✓	✓				D
7	✓					✓				✓		✓							✓				✓		✓		✓					C
8		✓			✓					✓		✓							✓				✓			✓	✓					B
9																																
10	✓				✓				✓		✓					✓		✓					✓	✓					✓			A

表1. カテゴリー反応表

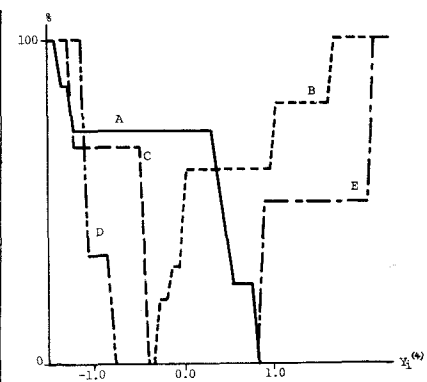
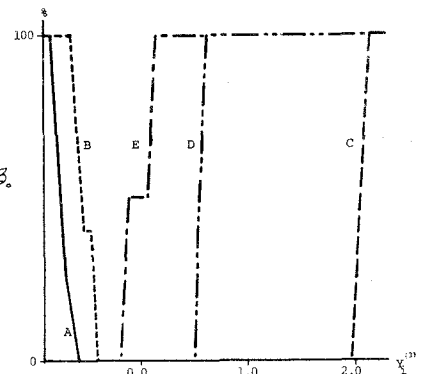
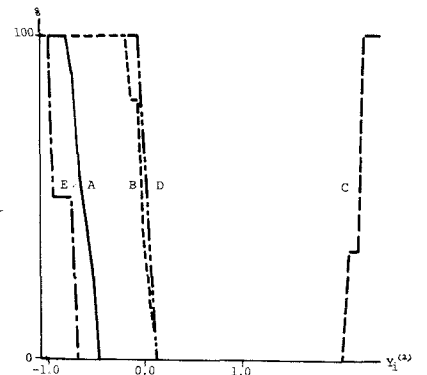
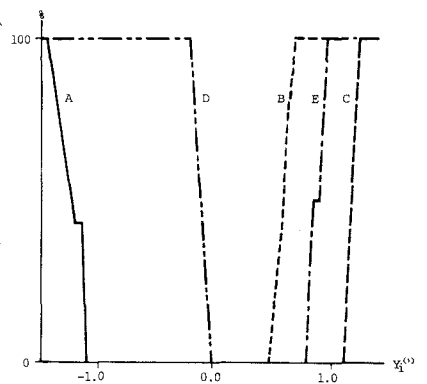


図2. 主軸に対する累積パーセント

- A; 健全と考えられ、軽微な補修程度でよい橋梁
 B; 主に沓部分を中心に補修の必要のある橋梁
 C; 主に橋脚・脚台の補修の必要な橋梁
 D; 橋脚・橋台の補修・補強の必要な橋梁
 E; 補強・改修が必要と考えられる橋梁

このA～Eの分類を外的基準として、数量化理論第Ⅱ類により上部構造、支承部などの各アイテム中のカテゴリー○, △, ×などにそれぞれ数値を与える。この場合、外的基準が5ランクに分かれているので、4つの相関比の値に対応して4種の数値が与えられている。これを基に、対象となった橋梁に対して判別のための4種の得点 $Y_i^{(1)}$, $Y_i^{(2)}$, $Y_i^{(3)}$, $Y_i^{(4)}$ ($i=1, \dots, n$; n =調査橋梁数)を計算する。このとき、ケース得点を横軸にとって外的基準の累積パーセント表を図2に示す。ただし、平均値が負のグループは最小値の側が100%、正のグループは最大値の側が100%となっている。

数量化理論により得られた各カテゴリーのスコアを用いることにより、新たにいくつかの橋梁に対して1～9の健全度評価項目を調査し、そのケース得点を計算し、図2を参照することにより健全度(A～E)を判定することが可能となる。

5. 数値計算例および考察

既設橋梁の全般的な健全度を評価するにあたって数量化理論第Ⅱ類を用いた数値計算例を示す。評価のための点検項目としては、3.に示したもののなかからデータの有無に従って以下の24itemを選んだ。

・伸縮装置に関して①アンカー及び取付けボルトの欠損 ②異状伸縮

・主桁、主構に関して③主桁、主構の損傷 ④主桁、主構の変形

表2. 各カテゴリーのスコア

item	cat.	value	item	cat.	value
1	A	0.083	13	A	0.017
	B	-2.438		B	-0.157
2	A	-0.025	14	A	0.132
	B	2.203		B	0.588
3	A	0.005		C	-1.713
	B	0.634	15	A	-0.127
	C	-1.018		B	1.524
4	A	0.132	16	A	-0.216
	B	-0.369		B	-0.747
	C	0.068		C	3.325
	D	-2.410	17	A	-0.039
5	A	-0.104		B	1.145
	B	1.094	18	A	-0.036
	C	-1.377		B	0.192
6	A	-0.129	19	A	-0.040
	B	2.222		B	-0.065
7	A	0.077		C	-0.036
	B	0.675		D	0.599
	C	-0.548	20	A	0.141
8	A	0.026		B	-0.172
	B	-0.363		C	-0.801
9	A	-0.338	21	A	0.199
	B	0.832		B	0.166
	C	0.634		C	0.748
	D	1.640		D	-2.829
10	A	0.176	22	A	-0.167
	B	-1.606		B	-1.156
11	A	0.777		C	3.260
	B	-2.516	23	A	0.080
	C	-1.458		B	1.145
	D	-2.104		C	-3.340
12	A	0.155	24	A	-0.249
	B	-3.179		B	1.276
	C	-5.220		C	6.293

⑤ 支承部ソールプレートの変形、ひびわれ ⑥ 対傾構と桁との取合部の変形 ⑦ 腐食、箱げた内部の滞水

・縦桁・横桁・対傾構に関して⑧それらの損傷

・下部構造に関して⑨橋脚、支柱の変形 ⑩橋脚内部の水溜

⑪基礎構造の変形に伴う沈下、移動、傾斜

・接合部・継手に関して⑫腐食による損耗

・支承部に関して⑬移動量の余裕不足又はそれによる変形、ひびわれ ⑭アンカーボルト、セッポルトのゆるみ

⑮支承板、ローラなどの錆つき ⑯沓座の沈下、圧壊

・付属設備等に関して ⑰落橋防止装置の移動量の余裕不足又はそれによる変形、ひびわれ ⑱高欄の変形

・コンクリート床版に関して ⑲ひびわれ ⑳剝離(剥落) ㉑鉄筋露出 ㉒漏水 ㉓劣化 ㉔空洞および豆板

以上のアイテムのうち①,②,③,④,⑤,⑥,⑦,⑧はA=small, B=largeの2段階評価、⑨,⑩,⑪,⑫,⑬,⑭,⑮,⑯,⑰,⑱,⑲,㉑はA=small, B=medium, C=largeの3段階評価、②,④,⑥,⑧,⑩,㉒はA=small, B=medium, C=

large, D=very large の4段階評価を行なう。外的基準としては、橋梁の健全度をⅠ健全である、Ⅱ補修の必要があるの2段階に分ける。対象とするデータは関西地区の橋梁調査の結果に基づいて作成した91ケースである。計算にあたっては統計パッケージSPSSのHAYASI2を用いた。

最大相関比0.9599に対して、各アイテム内のカテゴリに与えられた数値を表2に示す。アイテム内の各カテゴリの数値の最大と最小の差、すなわちレンジが大きいもの程、そのアイテムは大きな影響を橋梁の健全度に及ぼしているといえる。この例では、例えば②④などの項目の影響が大きいと考えられる。さらに対象としたデータのケース得点 Y_i ($i=1, 2, \dots, 91$)を計算することにより得られた外的基準グループⅠ,Ⅱの累積パーセントを図3に示す。次にたとえば、健全度が評価されていない3つの橋梁に関して上記の24 item についての視察を行なった結果、表3を得たとする。これらの橋梁1,2,3についてケース得点 Y を計算すると、0.524, -2.104, 0.319となった。従って図3より、橋梁1,3は健全、橋梁2は補修の必要があると判定される。このように、専門的知識を基に健全度評価を正しく行なった事例が数多くあれば、適切なチェックリストを作成し、新たに評価すべき橋梁群に関してケース得点を計算することにより、それらの健全度評価を比較的簡単にかつ高い信頼度で行なうことができる。

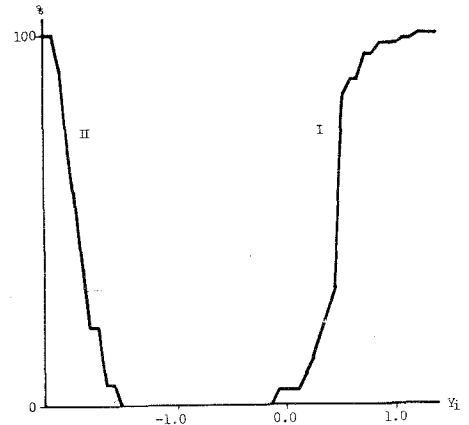


図3. 2つの外的基準の場合の累積パーセント図

次に、外的基準を2つからⅠ健全である、Ⅱ若干の補修が必要である、Ⅲ架け換える必要がある、の3段階に分け、同様の91ケースについて数量化理論第Ⅱ類によ

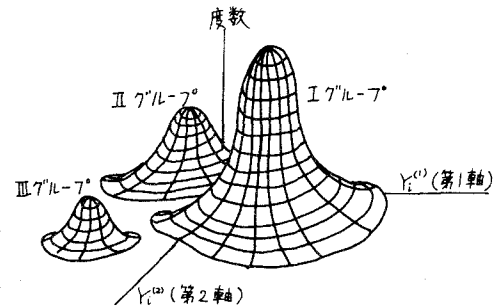


図4. 外的基準が3個の場合の Y_i の分布の模式図

て分析を行なった。2つの相関比0.993, 0.997に対してそれぞれ24 itemの各カテゴリに数値を与え、対象とした91ケースの得点 $Y_i^{(1)}, Y_i^{(2)}$ ($i=1, \dots, 91$)に対する個体数量($Y_i^{(1)}, Y_i^{(2)}$)の分布をⅠ,Ⅱ,Ⅲのグループに分けて模式的に描いたものが図4である。この例では、3つのグループは明確に分離して分布しているが、一般の場合には必ずしもこのような傾向がみられるとは限らない。このような場合には、1つの座標軸で一度に全グループを判別・予測するのではなく、第1軸たとえばA,B,Cの3グループのうちABとCの2つに判別し、第2軸でABをAとBの2グループに分けるなどの方法を用いることが必要となる。さらに、外的基準を4.での例と同様5つのグループに分けて計算すると、最大相関比~第4相関比(表4)に関してそれぞれのカテゴリに数値が与えられる。新たに評価すべき橋梁群に対しては、外的基準が3グループの場合と同様の方法で健全度評価が行なえる。

表4. 外的基準が5個の場合の相関比の値

アイテムNo.	橋梁No.		
	1	2	3
1	A	B	A
2	B	A	A
3	A	B	A
4	A	A	A
5	A	A	A
6	A	B	A
7	A	A	A
8	A	C	A
9	A	A	C
10	A	A	A
11	A	D	A
12	A	A	A
13	A	A	A
14	A	A	C
15	A	A	A
16	A	A	C
17	A	A	A
18	A	A	A
19	A	A	A
20	A	A	A
21	A	A	A
22	A	A	A
23	A	A	A
24	A	A	A

表3. 新たな橋梁の調査例

	correlation ratio
max	0.995
second	0.952
third	0.930
fourth	0.876

以上の結果から、ここで用いたデータからは損傷度に関する

外的基準の分類に関しては良好な結果が得られていることがわかる。これはデータ量が少なく、またデータが偏っているためとも考えられるが、外的基準が調査項目と直接的な関係にあるからである。しかし、少なくとも視察などによって得られる定性的ないわゆる質的データから明確な判断が行なえる可能性があることは明らかである。今後、さらに有用なデータを蓄積し、損傷度の評価段階も含めて外的基準の設定法をさらに検討する必要がある。そのためには、数量化理論を用いるという前提のもとで、最適なチェックリストを作成し、実際の橋梁調査を行うことが不可欠である。

6. あとがき

本研究は橋梁の健全度解析に数量化理論を用い、多岐に亘る数多くの要因の影響を総合的に評価することを試みたものである。特に、視察や観測によって得られるデータに注目し、外観的評価法を確立するための第1歩として、これらのデータの利用法について検討を加えた。本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 数量化理論を用いることにより、定性的な形で得られている視察による調査結果を有効に利用することができ、健全度の定量的な判断基準を得ることができる。橋梁の健全度の診断を行なうには、視察や観測による結果をチェックリストの形でまとめておく必要がある。
- 2) 数量化理論第Ⅱ類は橋梁の健全度診断に有効であり、本研究で用いたデータは量も質も十分なものではなかったが、健全度に関する外的基準の分類は明確な形で行なわれた。
- 3) さらに、各アイテムのレンジの大きさに注目することにより、健全度に大きな影響を与える要因の抽出が定量的に行なえる。例えば、本研究の数値計算によると、コンクリート床版の空洞化、接合・継手部の腐食、踏の沈下などが健全度に大きく関係していることがわかる。
- 4) 本方法をさらに有効なものとするためには、チェックリスト項目の検討、各項目の判断基準の明確化、十分なデータを得ることなどが必要である。今後、さらに橋梁の実態調査を実施し、その成果をデータバンクとして蓄積し、その充実を図ることが不可欠である。

最後に本研究を進めるにあたり貴重な御助言を頂いた岡山大学工学部谷口健男助教授に感謝致します。

参考文献

- 1) J.T.P.Yao: Probabilistic Methods for the Evaluation of Seismic Damage of Existing Structures, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol.1, No.3, pp130-135, 1982
- 2) 宮田実, 高木録郎: 橋梁調査報告一供用後の鋼橋の問題点とその実例一橋梁, 1976.4, pp28-33
- 3) 高架構造研究会: 道路橋の点検補修, 理工図書, 1978.1
- 4) 駒澤勉: 数量化理論とデータ処理, 朝倉書店, 1982.6

DIAGNOSIS OF BRIDGES BY QUANTIFICATION ANALYSIS

Naruhito Shiraishi*, Hitoshi Furuta* and Masakazu Sugimoto*

It is known that considerable number of bridges, at present, require repairing or alteration which are enormously expensive. Under this situation it is an emergent and important task to develop a method of evaluating the degree of damage for existing bridges. However, the damage assessment is very difficult, because the damage mechanism is complicated and concerned with various kinds of factors. Then, it is necessary to utilize the best information (even if sufficient data are unavailable) and integrate them into a valuable evaluation.

In this paper, an attempt is made to introduce different kinds of information into the damage assessment by using the second theory of quantification. At first, the procedure of damage assessment is described with the emphasis on the application to bridge structures. Although some experimental methods can be used for the damage assessment, they are often expensive or troublesome. Most practical is a method based on inspection or observation. Here, representative items needed for the inspection are enumerated, and they are categorized by considering their characteristic properties. Then, numerical values called "category score" are statistically determined for every categories. Using these scores, it is possible to estimate the degree of damage of bridges from their inspection results.

The second theory of quantification was applied for the damage assessment of existing bridge structures. Through numerical examples, the following conclusions were derived:

- 1) The use of quantification analysis makes it possible to draw the quantitative conclusions from the reconstrained information which is of qualitative nature. To carry out the diagnosis of bridges, it is efficient to summarize the inspection results in the form of check list.
- 2) It is confirmed that the second theory of quantification is particularly useful for the damage assessment of bridge structures. Although the number of samples is insufficient and the quality of the data is not well, the results show good separations between the selected damage conditions.
- 3) It is also possible to find out most important factors affecting the reliability and durability of bridges. The numerical results show that the states of damage are strongly related to such items as cavities in concrete slabs, corrosions of joints, defects of shoes and so on.
- 4) In order to prove the validity of the method developed herein, it is inevitable to collect a sufficient number of data through inspection or observation.

* Department of Civil Engineering, Kyoto University