

橋梁健全度評価に用いる評価方法の検討と 影響要因の解析

大島俊之¹・三上修一²・山崎智之³・丹波郁恵⁴

¹フェロー 工博 北見工業大学教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

²正会員 博士(工) 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

³正会員 北見工業大学助手 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

⁴学生員 工修 北見工業大学 工学部土木開発工学専攻博士後期課程 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

本論文は、橋梁維持管理システム (Bridge Management System, BMS) の一部としての橋梁の点検評価の問題を検討している。橋梁の各部材に対する点検員の判定結果に基づいて、橋梁全体の総合健全度を評価する手法としての加重平均法 (重み付き平均法) を提案している。またこの重み係数の決定においては損傷要因の分析、自然環境及び交通環境の影響を無視できないので、これらの影響について検討している。更にエキスパートの総合判定のばらつきの影響や耐震性を考慮に入れた健全度評価の方法についても検討している。

Key Words : BMS (Bridge Management System), bridge rating, total integrity evaluation

1. 序論

橋梁の維持管理問題は橋梁の「点検・評価」及び「維持補修」問題に大別される。前者の点検・評価においては人間の健康診断に相当し、橋梁の各部材に対する検査点検及びそれらを総合的に評価して、橋梁全体の健全度状態を判定するものである。一方後者の維持補修は人間に対する治療、手術に相当し、橋梁の寿命を長期化させるものである。

2030 年には我国の道路橋の約 50% が橋令 50 年以上になると言われており、これらの橋梁維持管理システム (Bridge Management System, BMS) に関連する研究開発が近年活発である。またこのような橋梁の点検・評価と維持補修をより高度にシステム化することによって社会基盤施設としての橋梁が信頼性のある構造物として定着できることとなる。

さてこれらの橋梁の維持管理に関連する課題のうち、本論文では前者の橋梁の点検・評価を対象として検討している。また橋梁の点検・評価は橋梁個々の部材に対する点検員の健全度判定の問題と、それらの各部材に対する判定結果を用いて、橋梁全体の総合健全度評価値を求める問題に大別される。本論文ではこれらのうち、後者の総合健全度評価に

関連する問題を取り扱っている。

この総合健全度評価に関連する内容としては、これまで我が国では、後で述べるように加重計算法及び減点法が用いられている。本論文による研究の目的は、1988 年 (昭和 63 年) に建設省土木研究所によって公表された「橋梁点検要領 (案)」²⁾ による非常に多くの実際の点検データを活用して、文献⁴⁾ において実用性が少ないと言われている橋梁全体の総合健全度を加重平均法 (重み付き平均法) によって求める方法を検討し、その有効性を検証しようとするものである。この加重平均法は長大橋が多いニューヨーク市交通局の計算法にも用いられているものであるが、その重み係数はニューヨーク市の熟練技術者の長年の経験の中から決定され、用いられているものである。

本論文では、多くの実橋データに対するエキスパートの判定結果を基礎とする手法によって求めた重み係数をニューヨーク市の値と比較することによって検証し、橋梁全体の総合健全度を評価する手法を提案しようとするものである^{5), 6), 7)}。

2. BMS における橋梁点検評価の現状と課題

(1) 我国の現状分析

我国の道路橋の橋梁点検業務は文献²⁾の建設省土木研究所が1988年(昭和63年)に公表した「橋梁点検要領(案)」に基づいて実施されている。この点検要領(案)はそれまでに統一化されていなかった、個々の部材に関する損傷の判定を全国的に統一化したことに意義がある。点検員による判定のばらつきや目視を主体とした判定であることなど、問題点は多いものの、ほぼ10年間統一された基準によって判定された点検データの集積は、今後の様々な点検方法の見直しのためにも有効に活用されるものと思われる。

一方、このようにして集積された点検データは、個々の橋梁の維持補修工事を実施するためのバックデータとして活用されてきた意義は大きいものの、橋梁全体の総合的健全度評価のために活用されてきたとは言えない^{3), 4), 6), 7)}。その理由は上記の点検データを有効に活用して橋梁全体の総合的健全度を評価するための実用的な手法が開発されなかったことによるものと思われる^{5), 8)}。

一方、橋梁の点検評価の研究開発に関しては、最近の10年間に於いて様々な提案がなされている。例えば古田ら⁹⁾、三上ら¹⁰⁾、宮本ら¹¹⁾、安田ら¹⁴⁾は点検業務にエキスパートシステムを導入する方法やニューラルネットワークの利用、更には数量化理論、ファジィ数量化理論などの活用についても提案している⁵⁾。これらの提案されている手段は今後のBMSのシステム構築の中で有効に活用されるべきものと思われる。

(2) アメリカにおける点検評価基準

OECDの報告書²¹⁾によれば各国のBMSの橋梁点検評価業務の実状がかなり把握できる。ここではこれらのうち、アメリカ合衆国の現状について本論文に関連のあるもののみ概観する。米国の橋梁点検システムについては点検員のトレーニング方法、点検手段、点検調査票、データ入力方法などでかなり詳細な内容が我国においても広く知られている。しかし各州がかなり独立している米国においては、AASHTO^{22), 23)}やFHWA²⁴⁾の国レベルの橋梁点検基準の他にカリフォルニア州のCaltransの独自の基準^{25), 26)}やニューヨーク州の基準^{27), 28)}及びニューヨーク市独自の基準^{29), 30)}など米国内において統一されている訳ではなく、地域性が反映された実状となっている。

これらの中で本論文に関連する内容としては文

献^{29), 30)}などに述べられているニューヨーク市内の橋梁点検評価に関連する手法が注目される。この手法においては橋梁全体の健全度評価値を求める際に、7段階法によって加重平均値を計算している。(具体的比較については後に詳述する。)

またFHWA²⁴⁾及びAASHTO^{22), 23)}の健全度評価においては³¹⁾、橋梁の機能的な評価を含めた総合健全度評価を計算するようになっている。

(3) 橋梁点検評価の今後の課題

橋梁点検評価の今後の課題としては個々の部材に対する橋梁点検法及び判定法の改善の問題と個々の部材に対する評価を橋梁全体の総合健全度評価に総合化するための手法の開発の問題に大別される。

本論文においては後者の総合健全度評価の問題を取り扱っているが、この総合健全度評価は個々の部材に対する評価値を基礎データとして成立するものであることから、前者の個々の部材に対する橋梁点検法及び判定法の改善は本論文の内容においても重要である。

個々の部材に対する橋梁点検法及び判定法の改善としては、前述したように、エキスパートシステムやニューラルネットワークの活用などによってこれまで以上に適確な判定が期待されるとともに、非破壊評価法(NDE, Nondestructive Evaluation)による定量的な評価手段を導入することによって、熟練技術者の判定が更に確実なものとなる。最近ではSmart Health Monitoring (SHM) と呼ばれる診断技術を活用して、橋梁構造の健全度状態を同定(System Identification)する新しい技術が開発されつつある³³⁾。

一方、橋梁全体の総合健全度評価についてはこれまでの加重平均法(重み付き平均法, Weighted Average Method)^{5), 6), 7), 8)}及び減点法^{3), 4)}などが提案されている。本論文においてはこのうち加重平均法について対象としているが、この加重平均法においても、重み係数をいかに合理的に決定するかは重要な検討課題である。またこれらの重み係数は長大橋などの橋梁形式による補正や地震環境、自然条件及び交通環境などによっても補正が必要であることから、これらの適切な評価法の確立が必要である。

文献⁵⁾においてはこの適切な重み係数の決定による橋梁全体の総合健全度評価法確立の必要性が期待されている。

表-1 点検部材項目

上部構造	主桁 1
	主桁 2
	主桁 3
	2次部材
	床版 1
	床版 2
下部構造	床版 3
	躯体
その他	基礎
	支承
	高欄
	地覆
	舗装
	伸縮装置

表-3 総合評価

OK：現状維持
IV：軽い補修を要する
III：大がかりな補修を要する
II：補修より架け替えをすすめる

表-2 主桁及び床版の損傷種類

部材	損傷の種類	
	鋼橋	コンクリート橋
主桁	腐食（主桁 1）	腐食（主桁 1） ・剥離，鉄筋露出
	亀裂（主桁 2） ・亀裂 ・破断	ひび割れ（主桁 2）
	その他（主桁 3） ・脱落 ・異常音 ・異常振動 ・たわみ	その他（主桁 3） ・遊離石灰 ・鋼板接着部の損傷 ・漏水，滞水 ・異常振動 ・異常たわみ ・欠損
床版	剥離（床版 1） ・剥離，鉄筋露出	剥離（床版 1） ・剥離，鉄筋露出
	ひび割れ（床版 2） ・床版ひび割れ	ひび割れ（床版 2） ・床版ひび割れ
	その他（床版 3） ・遊離石灰 ・抜け落ち ・鋼板接着部の損傷 ・漏水，滞水	その他（床版 3） ・遊離石灰 ・抜け落ち ・鋼板接着部の損傷 ・漏水，滞水

3. 橋梁維持管理のための総合健全度評価

前述したように、橋梁の維持管理業務の一部である橋梁点検業務に関しては、文献²⁾の建設省土木研究所の「橋梁点検要領（案）」に基づき、統一した判定基準として用いられている。点検によって得られた個々の部材に対する判定結果のデータは、データファイルとして蓄積され、1988年（昭和63年）の実施開始以来、膨大な量となっている。

またこれらの各橋梁の個々の部材に対する判定データを用いて橋梁全体の総合健全度を評価するとともに、維持補修業務及び架け替えなどの判断のための基礎データとなっている。

本論文においては、多数の実橋に対する点検結果の基礎データに基づいて、総合健全度の判定をエキスパートにアンケート調査として依頼し、この判定結果を数量化理論Ⅱ類による解析の際の外的基準に用いた。前論文⁶⁾においては、数量化理論Ⅱ類の解析を総合健全度評価のA, B, C, Dの分類に着目して実施したが、本論文においては総合健全度評価に用いる「重み係数」の検討に着眼しているので、数量化理論Ⅱ類のアイテムレンジと偏相関係数を中心として解析検討を行っている。

尚、この数量化理論Ⅱ類を用いて解析する手法は外的基準を各アイテムとの線形結合として表示し、重み係数を計算するものである。従って、各アイテ

ム間に連成の影響がある場合や、外的基準と各アイテムの関係に非線形性がある場合には、エキスパートシステムによる解析など他の手法によってその影響度を評価する必要がある。従って、本論文の数量化理論Ⅱ類を用いる手法は第1近似値としての意義を有していると思われる。

(1) 橋梁点検データの活用

建設省の点検要領（案）では点検箇所は20項目に区分されており、更にそれらに対し材質を考慮した損傷種類が32項目選定されている²⁾。前論文⁶⁾では部材項目の重要度を考え17項目としたが、本論文においては各部材の橋梁全体の総合評価に対する重要度を更に検討し、従来3分類されていた2次部材及び2分類されていた支承において、それぞれ統合して表-1に示すような14項目を選定し橋梁点検データを再編した。また部材材質による損傷の違いを考慮するため主桁及び床版に関しては3分類し、鋼橋とコンクリート橋に分け健全度を評価する。これについては表-2に示す。また点検要領（案）では部材損傷度についての判定基準をOK～Ⅰの5段階としているが、判定Ⅰに関しては早急な調査及び補修等の作業を要するため、實際上橋梁点検データはOK～Ⅱの4段階で判定区分されている。一方、健全度の総合評価はOK～Ⅱの4段階を設定し表-3に示す。

表-4 アンケート調査結果

No	主桁 1	主桁 2	主桁 3	2次 部材	床版 1	床版 2	床版 3	軀 体	基 礎	支 承	高 欄	地 覆	舗 装	橋 脚	基 礎	伸縮 装置	A 氏	B 氏	C 氏	D 氏	E 氏	平 均	ばら つき
1	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	IV	OK	OK	OK	OK	OK	III	OK	OK	IV	OK	OK	OK	1
5	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	IV	OK	IV	OK	OK	IV	IV	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	0
73	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	III	IV	II	OK	OK	III	OK	IV	IV	IV	IV	IV	1
199	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	IV	III	IV	II	III	III	IV	III	OK	IV	IV	IV	IV	IV	IV	0
203	OK	OK	OK	OK	II	II	OK	II	IV	OK	OK	IV	OK	II	IV	OK	III	IV	III	III	III	III	1
207	III	II	IV	III	OK	II	IV	OK	OK	II	OK	OK	OK	OK	OK	III	III	III	III	II	III	III	1
208	III	OK	II	III	OK	OK	OK	III	IV	OK	II	II	IV	III	IV	III	IV	IV	IV	IV	IV	IV	0
212	III	OK	OK	II	II	II	III	III	III	OK	OK	OK	OK	III	III	OK	III	II	III	III	III	III	1
234	II	OK	III	II	IV	IV	III	III	IV	II	OK	OK	OK	III	IV	III	II	IV	III	III	III	III	2
235	III	OK	OK	II	II	III	III	OK	II	II	OK	II	OK	OK	II	III	II	III	III	III	III	III	1

(2) 重み付き総合健全度評価式

点検を実施した橋梁の総合健全度を数量化理論Ⅱ類を用いて解析する上で外的基準が必要となる。そこでエキスパートを対象としたアンケート調査により、熟練技術者の判定事例を多数収集して定量的な判定基準を得た。尚、アンケート調査における評価対象橋梁は480橋（うち鋼橋240橋、コンクリート橋240橋）で10名のエキスパートに依頼した。アンケート調査結果の一例を表-4に示す。ここにNoは橋梁番号、また表-1に示した14項目の部材損傷度はOK～Ⅱの4段階で表されており、A氏からE氏の5名により総合健全度が評価されている。また表右欄の平均は、エキスパート5名により判定された総合健全度の平均健全度、ばらつきはそれらの最高評価と最低評価の差を評価段階数で表している。この結果ではエキスパートそれぞれの判断思考の違いから総合健全度は異なっている。そのため総合健全度を平均化したが、データの妥当性を考慮してばらつきが2以上となる橋梁を削除し、鋼橋202橋、コンクリート橋199橋で数量化理論Ⅱ類を適用し解析を行った。その結果算出された重み係数のうち1軸のみに関して図-1に示す。重み係数は解析におけるアイテムレンジの割合で表される。また重み係数は健全度評価時のエキスパートの部材に対する重視度を示す尺度となる。この重み係数を用いて点検した橋梁の総合健全度を評価する。図-1からも分かるように部材材質の違いから各部材に対する重み係数値は異なっている。ここで比較すると、鋼橋では主桁2（亀裂）で大きくなっている他、主要部材に関しては5%～10%と同程度の値となっているのに対し、コンクリート橋では主桁1（腐食）、主桁2（ひび割れ）及び基礎において大きく、床版では比較的小さくなっている。従って、重み係数から健全度評価時における使用材料の相違によるエキスパートの判断思考を見ることができる。本

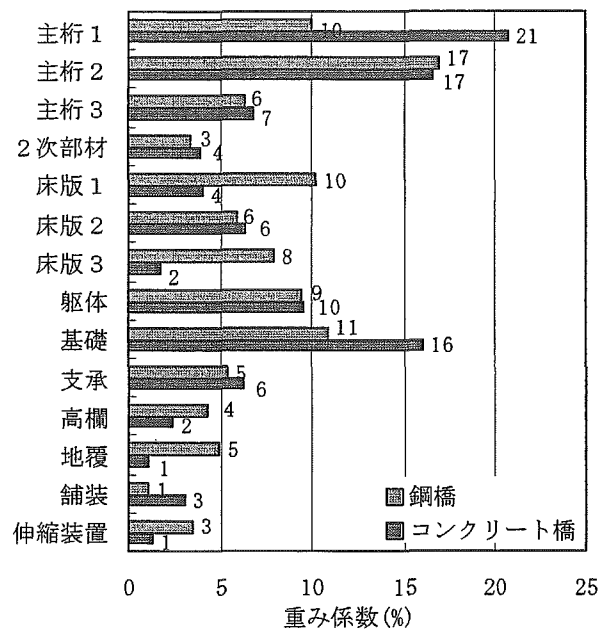


図-1 重み係数 (1軸)

解析ではエキスパートによる判定結果を外的基準として用いた数量化理論Ⅱ類の計算によって、ほぼ妥当な各部材の重み付けができたと考えられる。また表-5にニューヨーク市の重み係数と比較するため図-1の結果を再編した本解析の重み係数、表-6にニューヨーク市における橋梁健全度評価式で用いられる重み係数²⁹⁾を示す。これらと比較すると本解析の重みはニューヨーク市の重みに対して上部構造では大きく、下部構造及び支承においては小さくなっている。ニューヨーク市では長大橋が多いことから橋梁健全度を評価する際に下部構造を重要視し、河川洪水の頻度に関連した地域的特色を重視していると考えられる。このことから橋梁の架橋地点の地域的特色などを考慮した部材の重み付けが必要になると考えられる。図-1の鋼橋及び

表-5 本解析の重み係数

項 目	(%)	
(1) 主部材 (腐食、亀裂)	26	34
(2) 主部材 (その他)	8	
(3) 2次部材	10	10
(4) 床 版 (剥離、ひびわれ)	6	12
(5) 床 版 (その他)	6	
(6) 下部構造 (軀 体)	9	21
(7) 下部構造 (基 礎)	12	
(8) 支 承	8	8
(9) 高 欄	4	4
(10) 地 覆	4	4
(11) 舗 装	4	4
(12) 伸縮装置	3	3
	100	100

コンクリート橋に対する重み係数の結果、及びそれらを再編した表-5の重み係数に基づき、これらを更に主部材、床版、及び下部構造を統合して簡略化した評価式を誘導すると、5段階評価の総合健全度 S_t の評価式として近似的に次式が得られる。

$$S_t = 0.3S_{pri} + 0.2S_{sub} + 0.14S_{slab} + 0.1(S_{sec} + S_{shoe}) + 0.04(S_h + S_c + S_{pav} + S_{exp}) \quad (1)$$

ただし、 S_{pri} = 主部材の健全度、 S_{sub} = 下部工の健全度、 S_{slab} = 床版の健全度、 S_{sec} 、 S_{shoe} = 2次部材及び支承の健全度、 S_h 、 S_c 、 S_{pav} 、 S_{exp} = 高欄、地覆、舗装、伸縮装置の健全度

なお、式 (1) の S_t の値と表-3 の総合評価値とは次のように対応することとなる。

OK:5.0, IV:4.0, III:3.0, II:2.0

また式 (1) の計算を文献⁴⁾の減点法による計算と比較すると次のようになる。文献⁴⁾の表-3の各部材に対する健全度値のうち、主部材の健全度を $S_{pri} = 3$ 、支承の健全度を $S_{shoe} = 4$ とし、その他を5とすると式 (1) の計算は完全に健全な状態を 5.0 とすると

$$S_t = 0.3 \times 3 + 0.1 \times 4 + 0.1 \times 4 + 0.14 \times 5 + 0.1 \times (5 + 5) + 0.04 \times (5 + 5 + 5 + 5) = 4.3$$

となり、橋梁全体の百分率による健全度は $(4.3/5.0) \times 100 = 86\%$ となる。文献⁴⁾の加重平均法による計算値の 81.6%との比較では、本論文の計算において橋脚の軽い劣化を無視していることから、ほぼ一致する結果と思われる。一方、文献⁴⁾の減点法によ

表-6 ニューヨーク市の橋梁診断の重み係数

項 目	ポイント	(%)	
(1) 主部材	10	14	17
(2) 添 接	4	3	
(3) 2次部材	5	7	7
(4) 床 版	8	11	11
(5) 橋 脚	8	11	36
(6) 橋 台	8	11	
(7) 背面壁	5	7	
(8) 擁 壁	5	7	
(9) 橋梁台座	6	8	16
(10) 支 承	6	8	
(11) 高 欄	1	1	1
(12) 舗 装	4	6	6
(13) 歩 道	2	3	3
	72	100	100

る計算結果である橋全体の健全度の 32%の結果については、主桁の健全度が $50/100 = 1/2$ である点を特に重視する橋梁全体の総合健全度の評価法となっており、補修に重点をおく評価法としては有効な点があるものの、多くの橋梁を維持管理する立場で、後述の (4) 及び表-7 のように維持水準 (レベル) を比較する観点からは、加重平均法の方が各部材間の重み係数を数量化理論の裏付けに基づいてバランス良く考慮しており有効と思われる。

(3) 総合健全度ランキング表の作成

橋梁点検データから総合健全度ランキング表の作成を行った。ここでまずアンケート調査におけるサンプルスコアの散布図を 1 軸-2 軸、1 軸-3 軸に関して図-2 (a) (b) にそれぞれ示す。点検橋梁の総合健全度はこの散布図のどの評価領域に属すかにより判定される。ここで図-2 から評価 II の群はほぼ明確に分離されているのに対し、その他の群では重複する領域が存在する。本解析で適用した解析方法では 4 つの群が確実に分離することは稀であるため 3 軸を有効に活用して判定する。前論文⁶⁾では全 3 軸のサンプルスコアをコンピューターグラフィックスにより可視化し視覚的な健全度評価法について報告したが、本論文では各群間の境界値を決定しそれに基づく健全度評価を行っている。ここで境界値は各軸におけるサンプルスコアの群間の平均値を採っており、図-2 において破線で示している。また具体的な点検橋梁の総合健全度評価法については図-3 に示す。ここにサンプルスコア X の添え字は軸を表している。軸毎のサンプルスコアと境界値の大小関係により、1 軸で評価 II、2 軸で評価 III、3 軸において評価 IV 及び評価 OK を判別する。

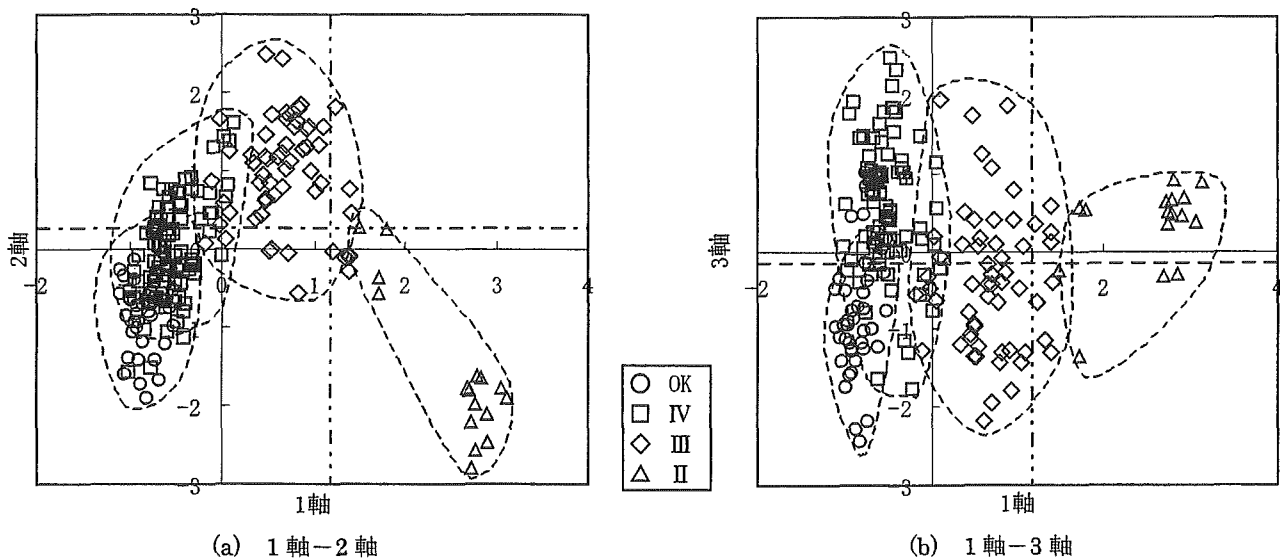


図-2 アンケート調査におけるサンプルスコアの散布図（鋼橋）

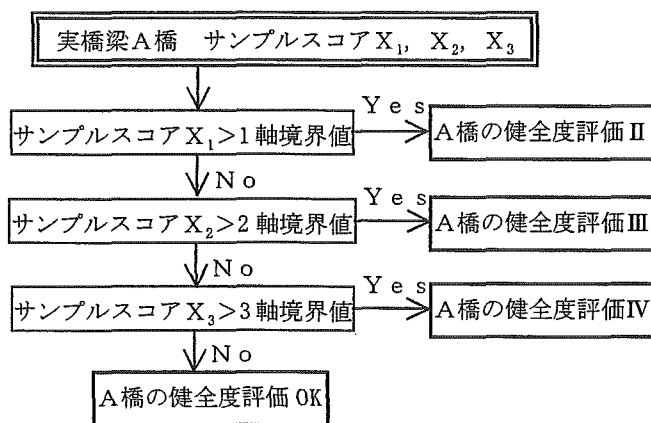


図-3 境界値による健全度診断

以上の結果から点検橋梁の総合健全度ランキング表を作成することができる。これは現場における業務優先順位を決定する際に活用できる。

本論文の主眼は橋梁維持管理のための橋梁の総合健全度評価法を提案することではあるが、この評価結果が維持補修・補強の実務において有効に活用されることが重要である。また建設省の橋梁点検要領（案）²⁾によれば、我が国の場合は国道の各橋梁に対して定期的点検評価は5年毎に実施される。この5年間の期間中に個々の部材がその要因に応じて健全度を低下させると同時に、総合健全度のランキングも変動する。また各部材の老朽化の程度に応じて部分的に補修・補強が実施される場合も多い。従って、橋梁の点検評価の観点からはこれらの橋梁点検データが常に更新されて、橋梁の維持管理状態が容易に把握できる、使いやすいシステムを構築することが望まれる。更に維持補修・補強を必要とす

る橋梁が今後ますます増加するとともに、維持管理のための経費を増加することは難くなる状況を踏まえて、維持管理経費を有効に活用するためには、本研究において対象としている診断評価結果を有効に活用して、個々の橋梁の健全度を常に許容水準以上に保つためのリスク管理に基づく判断が必要である。

(4) 総合健全度評価値の分布

文献²⁹⁾にも示されているが、橋梁の維持管理水準を確認するために、北海道内の619橋の個々の橋梁に対する総合健全度 S_t を図-1の重み係数を用いて計算した結果を表-7の橋梁数の欄に示している。また個々の橋梁においては各径間毎に総合健全度を評価することができる。従って、全径間数1394に対する評価値の分布は径間数の欄に示している。また最下欄にはそれぞれの S_t の平均値を示している。これらの結果から地域全体の橋梁の維持管理状況が把握できる。

前論文⁶⁾の図-12に示しているように、本論文の重み付き平均法によっても、各橋梁の総合健全度ランキングは相対的健全度評価結果として得られている。本論文では、それらの結果を直接示すことはせず、それらの評価結果の全体的傾向を示す意味で、総合健全度評価値 S_t の分布状況を表-7のように S_t の各範囲に判定された橋梁数及び径間数としてまとめている。また数量化理論の利点から点検データ数が今後増加するにつれて、重み係数値を含めた評価結果の信頼性が指数関数的に増加することとなる³⁴⁾。

表-7 総合健全度評価値の分布

S _i Rating	橋梁数 (%)	径間数 (%)
3.0 以下	4 (1)	0 (0)
3.0~3.5	28 (4)	30 (2)
3.5~4.0	79 (13)	96 (7)
4.0~4.5	190 (31)	338 (24)
4.5~5.0	280 (45)	796 (57)
5.0	38 (6)	134 (10)
合 計	619 (100)	1394 (100)
平均値	4.41	4.58

4. 健全度評価に影響する諸因子の分析

3 章では構造特性を含めた各部材の重み係数について検討したが、前述したようにより確実な健全度評価をするためには架橋地点の地域的特色を考慮した重み付けが必要である。橋梁の老朽化に関しては非常に多くの因子が影響しており、その進行状況及びその健全度の評価は地域により異なってくるのは明らかである。そこでまず部材の損傷度と影響因子との因果関係を明確にしておく必要があると考えられる。ここではこれまでに収集した橋梁点検データより部材損傷状況及び補修履歴を確認し、損傷に影響を及ぼす因子の選定を行い、部材損傷と諸因子との関連性について検討した。ここで対象とした橋梁は北海道内における国道橋全 619 橋（うち鋼橋 310 橋、コンクリート橋 309 橋）で昭和 63 年から平成 10 年度までに実施された定期点検のデータである。図-4 に供用年数別橋梁数の分布を示している。ここで縦軸は供用年、横軸は橋梁数である。高度経済成長期に架橋され供用年が 20~40 年の橋梁が多数を占めている。また戦後復興期から 1960 年代後半までは鋼橋に比べコンクリート橋の橋数が多いのに対し、1970 年代から近年にかけては逆転している。

(1) 部材別損傷状況の特徴

北海道では全域を 10 箇所の地域に分割して、橋梁の維持管理の実務が分担されている。また橋梁点検データは北海道全域を総括してデータの統合をはかり管理するとともに、個々の地域に点検データをフィードバックして維持補修業務に活用している。またこのような点検の結果には、統計的に地域の自然環境や交通環境が反映されたものとなっている。図-5(a)(b)には鋼橋（310 橋）及びコンクリート橋（309 橋）の部材別損傷状況の集計結果を示している。この図においては縦軸に該当する橋梁

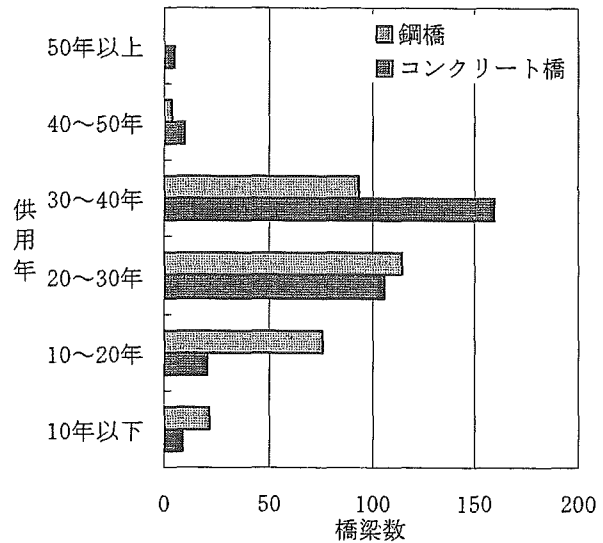


図-4 供用年別橋梁数

数の割合を百分率で示している。全体的特徴としては鋼橋、コンクリート橋両方に共通して、橋脚躯体の損傷度の割合が大きい。また支承においてⅡの評価が相対的に多い。また鋼橋においては床版Ⅰ（剥離）、床版Ⅱ（ひび割れ）及び伸縮装置のⅡの評価の割合が相対的に多い。更にコンクリート橋においては床版Ⅲ（遊離石灰等）の割合が多い結果となっている。全体的に橋脚躯体や支承の評価が低い原因として、地震による影響が考えられるが、北海道の相異なる 10 地域のほぼ全域においてこのような傾向が見られることから、むしろ積雪寒冷地域であることによる凍結融解作用による影響などが卓越しているものと考えられる。

また基礎及び鋼橋の主桁Ⅱ（亀裂）の項目にあまり損傷が見られていない。鋼橋の亀裂に関しては比較的供用年数が短いことや重量交通の割合が少ないことが挙げられる。また定期点検における目視及び簡易器具による点検では亀裂発見が困難という点検方法上の問題点も考えられる。

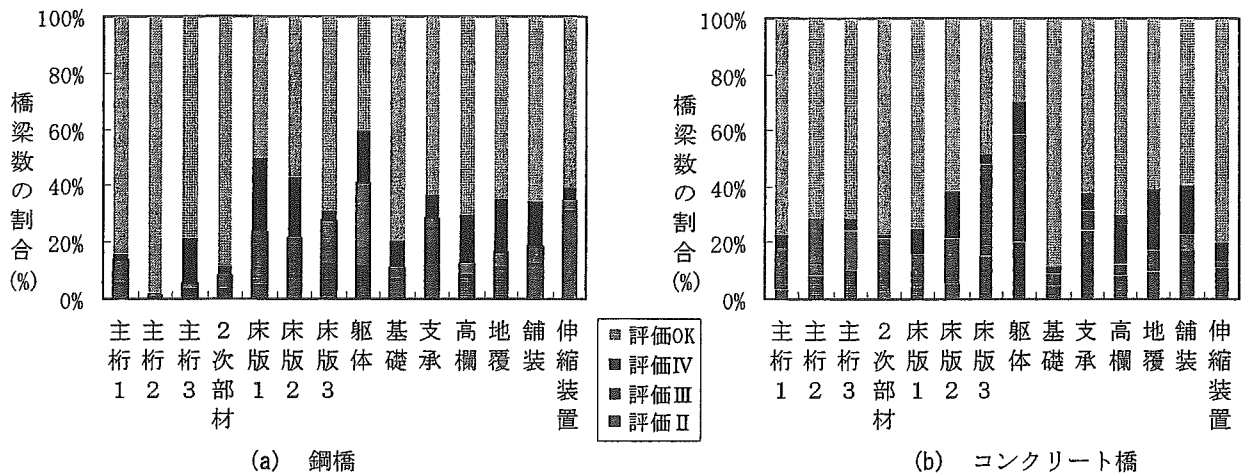


図-5 部材別損傷状況

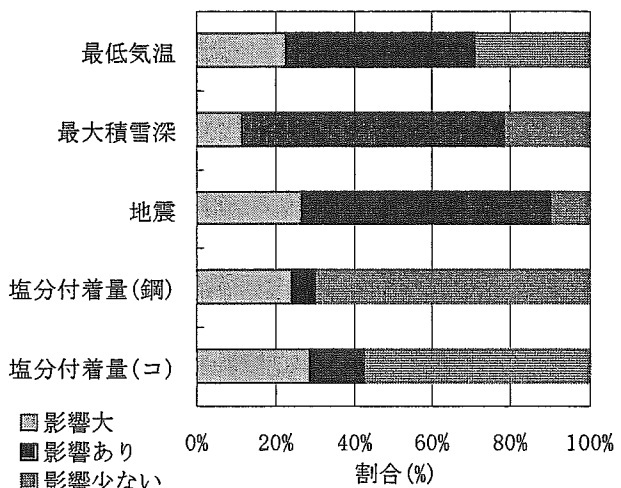
(2) 自然環境の影響

部材損傷に関与する因子として北海道における自然環境について検討する。北海道の特色としては寒冷地及び積雪地帯であること、及び地震の頻度の高さが挙げられる。従って、最低気温（℃）、最大積雪深（cm）、地震（規模の期待値）の3項目を選定し、更に沿岸地域における塩分付着量（mg）の項目を加え計4項目に関して部材損傷との相関性について検討する³⁵⁾。ここで各因子が損傷に影響する度合を“影響が大きい”、“ある程度影響する”、“影響少ない”の3段階に分ける。北海道全域を文献³⁵⁾に基づいて、表-8の各影響因子の分類に従って地域区分し、その各地域区分内に存在する橋梁として、解析対象としている全619橋の橋梁数の割合を表示したものが図-6である。この結果から最低気温、最大積雪深及び地震の項目については影響大と影響ありの割合が高く、その影響が大きいことが明らかであり、また塩分付着量については影響大の割合が20～30%程度と比較的高くなっている。

従って、これらの項目を対象として、それぞれ個々の橋梁がどの地域に存在しているかによって「影響が大きい」、「ある程度影響する」、及び「影響少ない」の3つの分類の外的基準に分類できるものとする。そして全619橋の各部材に対する点検結果のデータをアイテム及びカテゴリの分類として、前述と同様に用いて数量化理論Ⅱ類の解析を実施する。解析結果のうち各アイテムに対する偏相関係数の値の意味は、上記の自然環境の違いの影響が各部材の判定結果とどのような相関関係を有しているかを検討できることである。図-7(a)(b)(c)に最低気温、最大積雪深及び地震の3つの自然環境に対する各部材の偏相関係数の結果を百分率に換算して示している。(a)の最低気温との相関では支承と主

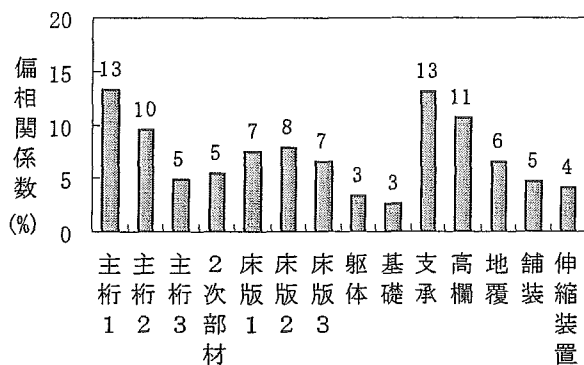
表-8 影響因子の分類

影響因子	影響大	影響あり	影響なし
最低気温（℃）	-35～-45	-25～-35	-25以上
最大積雪深（cm）	250以上	150～250	150以下
塩分付着量（mg）	20以上	15～7	3以下
地震（期待値）	5以上	3～4	1～2

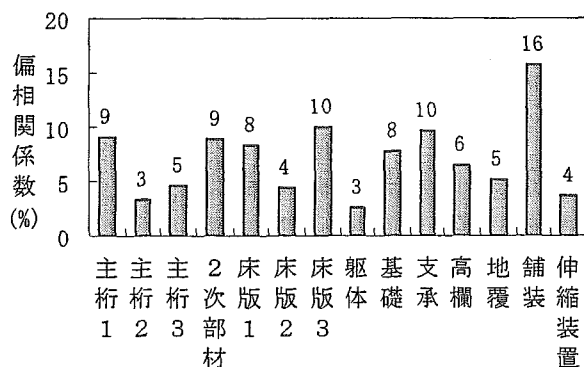


桁1（腐食）との相関が大きい。また(b)の最大積雪深とは舗装の相関が強い。一方(c)の地震との相関では特に顕著なものはない。当初、地震との相関について下部構造や支承に強い相関を期待していたが、地震直後にはこれらの被害を直ちに復旧することが多いことから、本解析結果の中には強く現れていないものと思われる。

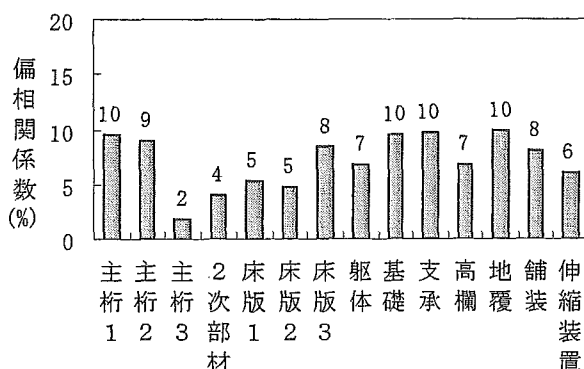
また塩分付着量の影響度を鋼橋についてのみ同様に解析した結果からは主桁1（腐食）に特に強い相関関係が得られている。



(a) 最低気温



(b) 最大積雪深



(c) 地震

図-7 偏相関係数の結果

(3) 交通環境の影響

交通環境と部材損傷との関係については貨物車を含めた大型車の混入率との関係に着目して解析を行った。この大型車と RC 床版の劣化損傷の関係は文献³⁶⁾などにおいて指摘されているところであり、本論文の解析結果においても同様の相関関係が予想されるものである。図-8 には大型車混入率と床版 1 (剥離) の損傷状況の関係を損傷橋梁数の割合として示している。大型車混入率のデータは文献³⁷⁾の交通量調査結果を各橋梁に対して用いている。実線は点検評価値が IV 以下の何らかの損傷が確認された橋梁を示しており、破線は点検データの中に

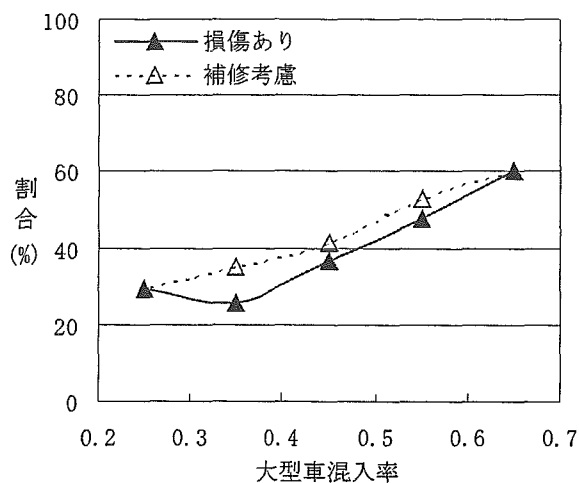


図-8 大型車混入率と床版 1 (剥離) の関係

表-9 大型車混入率(%)の分類

大きい	中程度	小さい
50 以上	40~50	40 以下

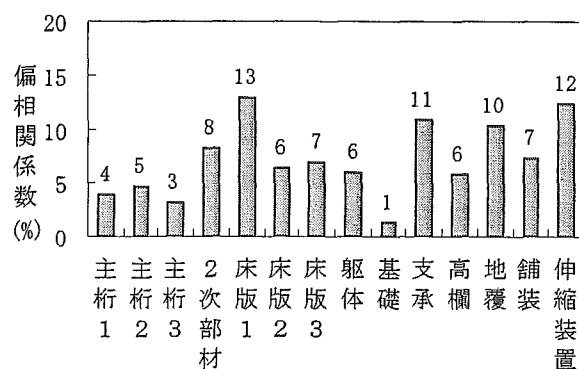


図-9 偏相関係数の結果 (大型車の混入率)

床版の補修履歴が記載されている場合はその橋梁の数を加えた結果である。いずれも大型車混入率の増加に伴い、床版の損傷は増大しており、相関の大きさを示している。

また前節(2)で述べたように、大型車混入率の程度を大きい、中程度、小さいの3つの分類に分類する。この分類について表-9に示す。これを外的基準に用いて全 619 橋の数量化理論 II 類の解析を行い、各部材に対する偏相関係数の値を比較したものが図-9である。これによれば大型車混入率は点検項目のうち床版 1 (剥離)、支承及び伸縮装置と相関関係が強いことが分かる。この場合、舗装も強い相関関係となることが予想されるが、舗装は橋梁の定期点検の間隔より短い周期でオーバーレイされることから、結果に強く現れていないものと思われる。

表-10 アンケート調査結果 (ファジィ数量化理論Ⅱ類)

No	主桁1	主桁2	主桁3	2次部材	床版1	床版2	床版3	躯体	基礎	支承	高欄	地覆	舗装	橋脚	基礎	伸縮装置	A氏	B氏	C氏	D氏	E氏	外的基準 (帰属度)			
																						OK	IV	III	II
1	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	IV	OK	OK	OK	OK	OK	III	OK	OK	IV	OK	OK	0.8	0.2	0.0	0.0
5	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	IV	OK	IV	OK	OK	IV	IV	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	1.0	0.0	0.0	0.0
73	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	III	IV	II	OK	OK	III	OK	IV	IV	IV	IV	0.2	0.8	0.0	0.0
199	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	IV	III	IV	II	III	III	IV	III	OK	IV	IV	IV	IV	IV	0.0	1.0	0.0	0.0
203	OK	OK	OK	OK	II	II	OK	II	IV	OK	OK	IV	OK	II	IV	OK	III	IV	III	III	III	0.0	0.2	0.8	0.0
207	III	II	IV	III	OK	II	IV	OK	OK	II	OK	OK	OK	OK	OK	III	III	III	III	II	III	0.0	0.0	0.8	0.2
208	III	OK	II	III	OK	OK	OK	III	IV	OK	II	II	IV	III	IV	III	IV	IV	IV	IV	IV	0.0	1.0	0.0	0.0
212	III	OK	OK	II	II	II	III	III	III	OK	OK	OK	OK	III	III	OK	III	II	III	III	III	0.0	0.0	0.8	0.2
234	II	OK	III	II	IV	IV	III	III	IV	II	OK	OK	OK	III	IV	III	II	IV	III	III	III	0.0	0.2	0.6	0.2
235	III	OK	OK	II	II	III	III	OK	II	II	OK	II	OK	OK	II	III	II	III	III	III	III	0.0	0.0	0.8	0.2

本章では橋梁の健全度の点検結果に影響するいくつかの因子について点検データに基づき検討した。一方、本論文の目的は橋梁全体の総合健全度評価を実施する手法を検討することにあるので、この影響する諸因子を総合健全度の加重平均法による評価の中で、どの様に反映するかがその課題となる。最終的にはこれらの影響諸因子を加味して重み係数を補正する問題に帰着するものと思われるが、しかし本章で得られた結果のみからその補正量を確定するには現段階で無理がある。従って、それらは今後の検討課題である。

5. エキスパート総合判定のばらつきの影響の検討

本論文においては、橋梁全体の総合健全度を評価するための重み係数に着目しているが、本章ではファジィ数量化理論Ⅱ類の手法を用いて、エキスパートの総合判定のばらつきを考慮して解析を行い、重み係数に影響する割合を検討した^{9), 39), 40), 41)}。

(1) ファジィ数量化理論Ⅱ類の適用の目的

ファジィ数量化理論は数量化理論の外的基準及びアイテムのカテゴリをファジィ集合として拡張し、連続的に変化するデータ構造として、データ値の分布(ばらつき)を評価できる点が利点である。本論文ではエキスパートの総合判定のばらつきをファジィ数量化理論Ⅱ類の外的基準のファジィ帰属度として用いて解析し、エキスパート総合判定のばらつきが重み係数にどの様に影響するのかを検討する。ここでアンケート調査結果に関して3章の表-4と同じデータを用いたファジィ数量化理論

Ⅱ類における解析データを表-9に示す。ここに表中右端のOK～Ⅱはそれぞれの評価に対する帰属度を表している。これは各評価を下したエキスパートの人数の全人数に対する割合の分布を用いている。表-4の数量化理論Ⅱ類では依頼したエキスパートの判断のばらつきを平均化しているのに対し、ここでは評価毎の帰属度としてばらつきを含めた解析データとしている。これによりエキスパート個人の判断思考のばらつきを有効的に活用することが可能となる。また解析結果に対しては健全度評価をする際に重要となる判定境界付近のファジィ的な表現からよりの確な判定が可能である。

(2) 解析結果

図-10(a)(b)にサンプルスコアと帰属度のグラフをそれぞれ鋼橋及びコンクリート橋に対して示す。ここにグラフ中の実線は各評価群を4次多項式によって近似した曲線である。サンプル数が多いことからグラフ上に全てを布置し、またそれらを曲線で近似する事が困難となるため、サンプルスコアの最大値から最小値を30分割してそれぞれのサンプルスコア及び帰属度を平均化している。ここで更なる解析精度の向上を図るためには近似曲線の妥当性について検討が必要とされる。このグラフから数量化理論による解析の場合と同様、Ⅳ及びOKの分類評価は微妙な判定となることが分かる。

著者らの前論文⁶⁾においては数量化理論によってOK, Ⅳ, Ⅲ, Ⅱの4分類を詳細に検討する手法として、コンピュータ・グラフィックスの3D-Rotationの手法を用いて、4分類の基軸となるべき1軸, 2軸, 3軸上のサンプルスコアを3次元空間上に表示して、4分類作業をより詳細に検討できることを示した。本論文で用いたファジィ数量化理論

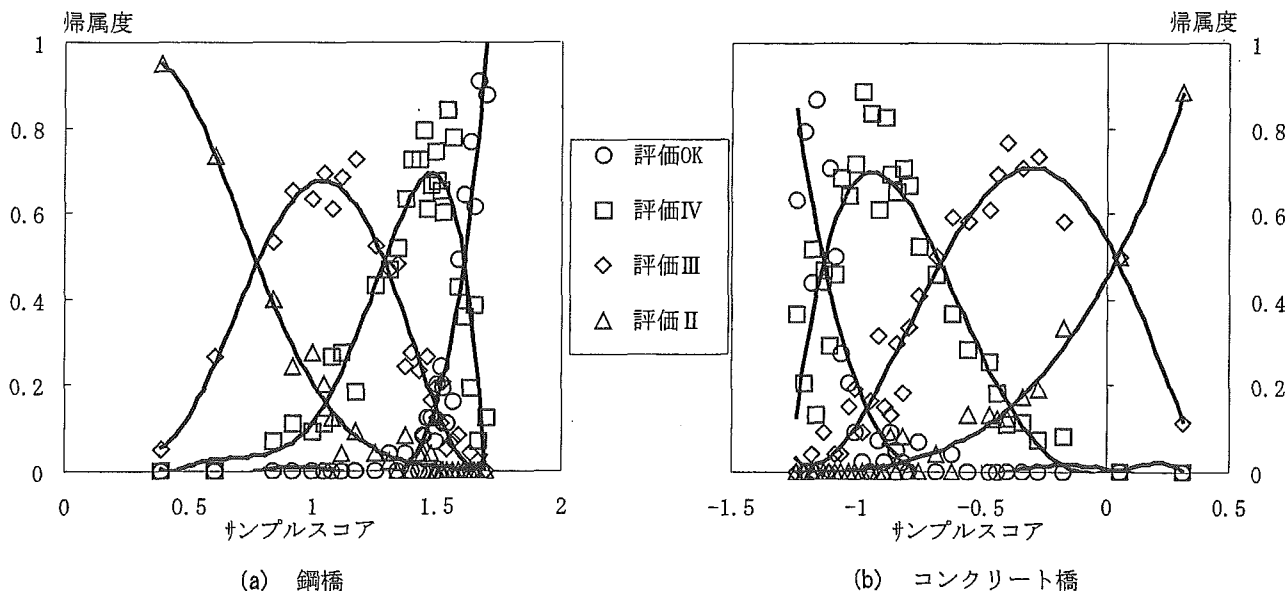


図-10 ファジィ数量化理論Ⅱ類によるアンケート調査の解析結果

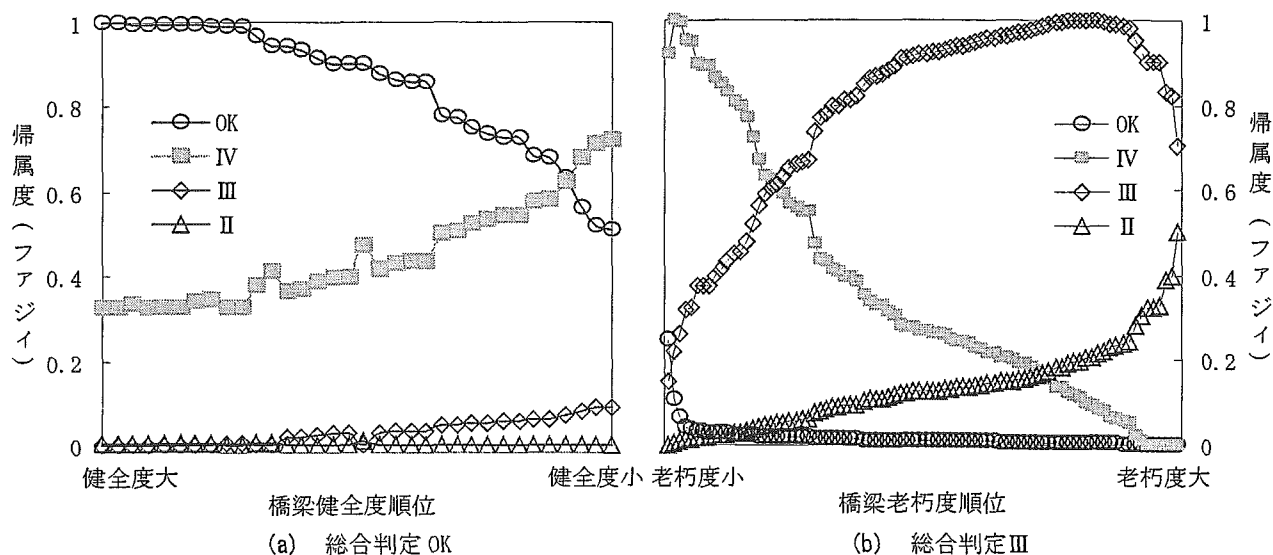


図-11 ファジィ数量化理論による老朽度順位付けと比較

Ⅱ類による手法も同様に、上記の4つの分類への帰属度関数値として定量的に評価できる点が有効である。図-11には解析対象とした橋梁のうち、総合評価がOK及びⅢと分類された橋梁について各分類に対する帰属度の結果を示している。横軸はそれぞれ個々の橋梁の健全度(OK)または老朽度(Ⅲ)が大きい順に順位付けして配列している。この図から(a)においてはOKに対する帰属度が減少するに従って、Ⅳに対する帰属度が増加していく状況と、また(b)図においては老朽度が小であるとⅣに対する帰属度は1に近く、老朽度が大きくなるにつれてⅣに対する帰属度は減少するとともに、Ⅱに対する帰属度が増加し、更に老朽度が大きくなるとⅡに対する帰属度は0.5程度と大きくなる状況が分かる。

橋梁の健全度評価の実務をシステム化して定量的に判定できる手法を構築する場合、評価結果を数量的に表示することが必要である。一方、実際の橋梁点検データから求まる5段階の健全度評価分類法によれば、評価結果が分類境界付近にある場合には、エキスパートの総合判定に「迷い」と「ばらつき」が発生する原因となる。従って、図-10及び図-11のようにファジィ数量化理論によって、各分類に対する帰属度が数量的に表示されていれば、総合判定を実施する際にそれらを活用できることとなる⁹⁾。

しかし本論文の主眼は、表-5のように各部材の健全度に対する重み係数を決定して、各橋梁に対する総合健全度評価法を確立することにある。その際

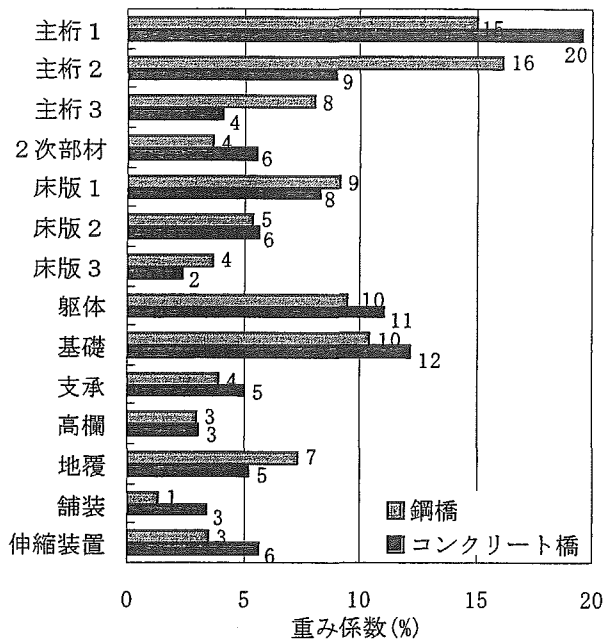


図-12 ファジィ数量化理論による重み係数

エキスパートの判断のばらつきから重み係数が大きく変化する場合には、評価法全体が不安定なものとなるが、次項で述べるようにエキスパートの判断のばらつきを考慮しても、重み係数そのものは大きく変化しないことが確認できる。

(3) 重み係数の比較

図-12 にファジィ数量化理論Ⅱ類による解析によって得られた各部材の重み係数を1軸に関して示している。この結果を、3章の図-1に示した数量化理論による重み係数の結果と比較することができる。図-1の結果と図-12の結果は全体的にはほぼ等しく、エキスパートの総合判断のばらつきによる解析結果への影響を検討するという観点からみて、ばらつきを考慮しても図-1の重み係数は大きく変化しないことが確認できた。

6. 耐震性を考慮した健全度評価の検討

震災時において橋梁は道路の一部として避難路及び救援物資または復旧資材等の輸送路を確保する上で、十分な耐震性を有していることが必要である。しかし、地震による橋梁の被害状況は多数の要因が複雑に関係しており、確かな被災予測は困難であることに加え、被災が予想される橋梁全てに対する耐震補強の実施も経済的に困難である。そこで技術者に課せられる課題は耐震性を含めた的確かつ合理的な健全度評価及び維持管理計画による震災

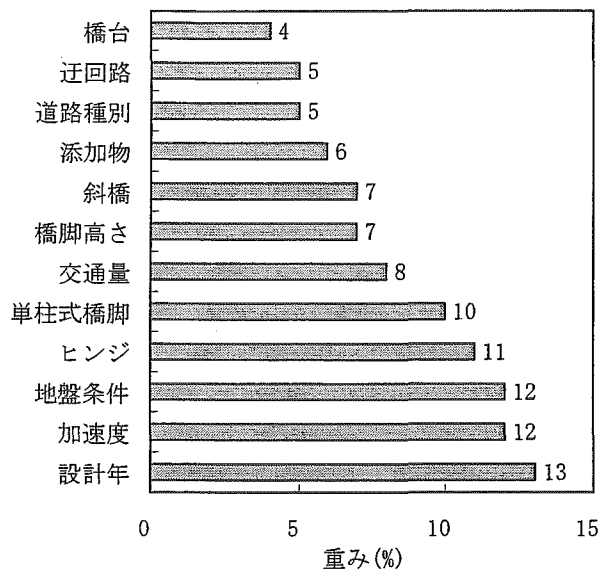


図-13 カリフォルニア州交通局における耐震判定の重み

表-11 耐震性判定のアイテム及びカテゴリ

アイテム	カテゴリ(判定)
1) 上部構造	Ⅲ Ⅱ
2) 下部構造	Ⅲ Ⅱ
3) 支承	Ⅲ Ⅱ
4) 桁掛長	1.5SE SE以上 SE以下
5) 落橋防止装置	有り なし
6) 液状化	可能性低 場合による 可能性高
7) 地盤種別	I種 Ⅱ種 Ⅲ種
8) 適用示方書	平成8年 平成2年 昭和
9) 地域区分	C B A
10) 重要度	A種 B種

時の被災軽減と考えられる。また近年では各地の地震発生に伴う大災害が増加しており、更に北海道においても4章の図-6からも予想されるように、過去の地震により影響を受けた地域の橋梁数は約90%と地震被害の発生頻度の高さ及び地域の広がりの特徴である。このことから、耐震性を考慮

表-12 物理的損傷度の判定

判定区分	一般的状況	判定
OK	点検の結果から、損傷が認められない。	Ⅲ
Ⅳ	損傷が認められ、その程度を記録する必要がある。	
Ⅲ	損傷が認められ、追跡調査を行う必要がある。	
Ⅱ	損傷が大きく、詳細調査を実施し補修するかどうかの検討を行う必要がある。	Ⅱ

表-13 桁掛長の判定

桁掛長	判定
1.5×必要桁掛長以上	1.5SE
必要桁掛長以上	SE 以上
必要桁掛長未満	SE 未満

表-14 適用示方書の判定

適用示方書	判定
平成2年以前の示方書	昭和
平成2年以降平成8年以前の示方書	平成2年
平成8年の示方書	平成8年

表-15 耐震性総合評価

判定	耐震性能の程度
A	耐震性能あり
B	耐震性劣る
C	かなり危険
D	早急に要補強

した健全度評価システムの早急な開発が望まれる。本論文ではこれまで実施してきた物理的健全度評価を踏まえた上で、更に耐震性を考慮した健全度評価法を検討する。物理的健全度評価と更に防災総点検要領⁴²⁾に基づく橋梁耐震性に関連するアイテムを選定し、実際現場におけるエキスパートに対しアンケート調査を依頼した。その結果を数量化理論により解析し、得られたそれぞれのアイテムに対する重み係数を考慮した耐震性健全度評価を行う。ここで例として図-13 にカリフォルニア州交通局 (Caltrans) で実施されている耐震性判定に用いる加重平均モデルの重み係数を示す⁴³⁾。

(1) アイテムの構成

橋梁の耐震性を考慮した健全度評価を行うにあたり、表-11 に示すような橋梁の耐震性に関連するアイテム及びカテゴリを選定した。ここでアイテムは大きく分けて3つの要素から成り立っている。まず1つ目は橋梁の物理的健全度に関連する要素（上部構造、下部構造、支承の3項目）、2つ目は橋梁の耐震構造に関する要素（桁掛長、落橋防止装置、適用示方書の3項目）、最後に橋梁が架橋している地域の要素（液状化、地盤種別、地域区分、重要度の4項目）であり、計10項目のアイテムとしている。橋梁の物理的健全度に関する項目については表-12 に示すように「橋梁点検要領（案）」²⁾に基づく損傷度判定による判定とする。また、橋梁の

耐震構造に関する項目は落橋防止装置の有無による判定、桁掛長及び適用示方書については表-13 及び表-14 に示す。尚、地域の環境に関する4項目については道路橋示方書から抜粋し適用しているため省略する。以上の10項目のアイテムから総合的に橋梁の耐震性に対して表-15 に示すような耐震性能の総合評価の程度として4段階に分類する。

(2) 解析概要

前節で説明した耐震性に関連する10項目とそれぞれのカテゴリ（表-11）及び耐震性能に対する4段階の総合評価（表-15）を用いてアンケート調査を依頼した。アンケート調査は10年以上橋梁関係業務に従事しているエキスパート（国家公務員1名、地方公務員1名、橋梁製作技術者3名、土木設計コンサルタント技術者10名の計15名）に300橋の耐震判定を依頼した。アンケート調査に使用した用紙の一例を図-14 に示す。このアンケート調査結果を3章と同様、数量化理論Ⅱ類により解析した。その結果、橋梁の耐震性能の評価における各アイテムに対する重み係数が得られ、これらに基づく定量的かつ客観的な耐震性評価を行うことができる。尚、ここでアンケート調査結果においてエキスパートによる判定にばらつきが見られたが、ばらつきによるデータの削除は行わず300橋で解析した。

橋梁耐震性診断調査

判定 A : 耐震性あり
B : 耐震性劣る
C : かなり危険
D : 早急に要補強

	上部構造	下部構造	支承	桁掛長	落橋防止装置	液状化	地盤種別	適用示方書	地域区分	重要度	判定
1	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	SE 以上	有	場合による	Ⅱ種	平成 8 年	A	B 種	
2	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	SE 以上	有	可能性低	Ⅱ種	昭和	B	B 種	
3	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	SE 未満	有	場合による	Ⅱ種	平成 2 年	A	A 種	
4	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	SE 以上	有	可能性低	Ⅰ種	平成 2 年	B	B 種	
5	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	SE 以上	無	可能性低	Ⅰ種	昭和	B	B 種	
6	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	SE 未満	無	場合による	Ⅱ種	平成 2 年	A	A 種	
7	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	SE 以上	有	可能性低	Ⅱ種	昭和	B	A 種	
8	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	SE 以上	無	可能性高	Ⅰ種	昭和	C	A 種	
9	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	SE 未満	有	可能性高	Ⅲ種	平成 2 年	B	B 種	
10	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	1.5SE	有	場合による	Ⅲ種	平成 2 年	A	A 種	

図-14 アンケート調査用紙

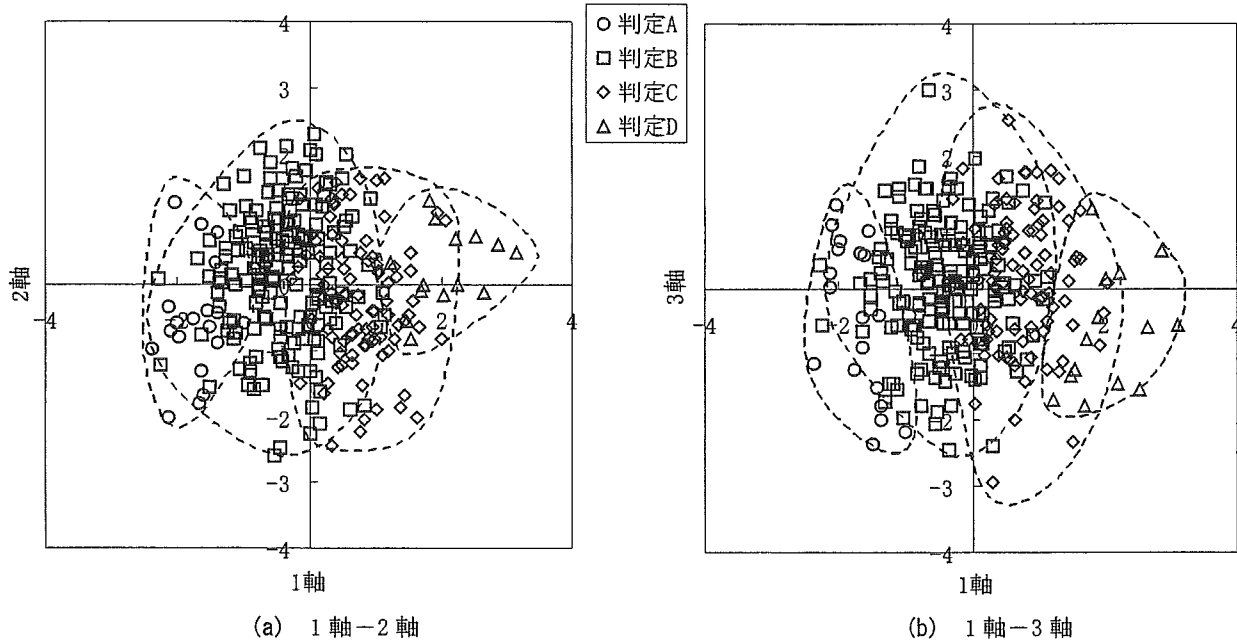


図-15 耐震性評価に関するアンケート調査におけるサンプルスコアの散布図

(3) 解析結果と重み係数

解析結果として図-15(a)(b)に1軸-2軸及び1軸-3軸のサンプルスコアの散布図を示す。またそれぞれの軸における相関比を表-16に示す。相関比は1軸においてはある程度高い値となったのに対し、2軸、3軸に関しては低い結果となった。このことは図-15からも分かるように1軸において重複領域は見られるがある程度の分離傾向を示しているのに対して、2軸、3軸については重複しており、各群の分離傾向は小さい。これはエキスパー

表-16 相関比

	相関比
1 軸	0.66439
2 軸	0.04394
3 軸	0.03500

トによる判定のばらつきの影響と考えられるが、この結果はエキスパート個人個人のデータを解析した場合にも同様な傾向が見られたことから耐震性能に対する判定の難しさが伺われる。本解析では判

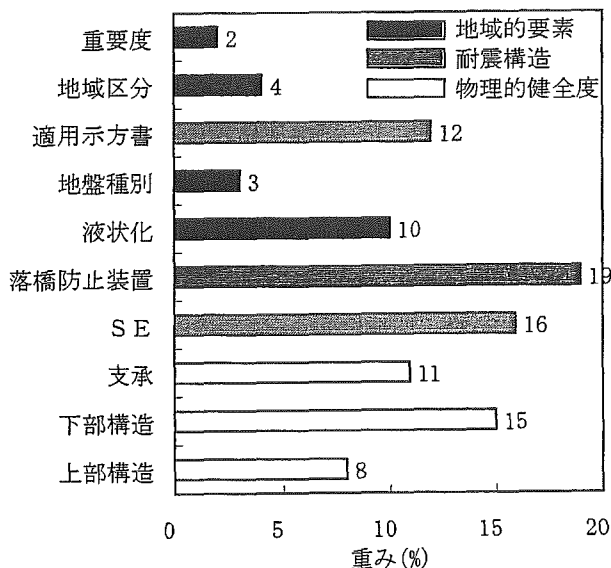


図-16 耐震性評価における重み係数

定の信頼性を考え、1軸のみを活用して総合健全度評価を実施した。図-16に1軸における各アイテムの重み係数を示す。重み係数は橋梁自体に関連する物理的健全度並びに耐震構造に関する項目において合計で81%と架橋地域環境に関する項目に比べて非常に大きな重みを示している。更に耐震構造に関係する項目においては全体の約半分を占めており、その中でも落橋防止装置及び桁掛長については35%と約1/3を占めていることより耐震構造に直接関連する項目が重要視されていることが分かる。

本章の耐震性を考慮した健全度評価における重み係数の解析結果は、前述したように、数量化理論を用いていることから、外的基準が各アイテムと線形結合の関係にあるものとして得られた結果である。文献⁴³⁾にもあるように、健全度評価式を加重積として評価する手法の検討やアイテム間の非線形性の検討など、今後検討する課題は多く、本論文の結果はこれらに対して第1近似値としての意味を有しているものと思われる。

7. 結論

本論文では橋梁維持管理のための総合健全度評価において、解析方法に数量化理論及びファジィ数量化理論を適用した場合の評価方法または判定結果の比較を行い、また橋梁の健全度に影響する様々な因子と部材損傷の相関性について検討すると共に耐震性を考慮した健全度評価方法について検討した。得られた結論を要約すれば以下ようになる。

- (1) 数量化理論Ⅱ類による解析から橋梁健全度評価における各項目の重み係数を決定でき、それを用いた総合健全度評価式、更に橋梁点検データを活用した総合健全度ランキング表を作成することができることを示した。
- (2) 橋梁の老朽化に影響する諸因子を解析し、それらと部材損傷との関係について検討を行った結果、各因子が部材損傷に影響する関係のある程度把握できた。
- (3) アンケート調査におけるエキスパートの判断のばらつきを含めた解析方法として数量化理論Ⅱ類からファジィ数量化理論Ⅱ類に変更して解析した結果、重み係数に関しては数量化理論による結果と全体的に変化が少なく、数量化理論による重み係数の結果がほぼ妥当なものであることが確かめられた。
- (4) 橋梁の耐震性を考慮した健全度診断を行うためのアイテム及びカテゴリの選定、並びに数量化理論Ⅱ類を用いた解析により各アイテムに対する妥当な重み係数が得られた。

本論文の解析に用いた橋梁点検結果のデータは北海道内の国道橋に関するものであり、解析結果にある程度地域性の影響が含まれているものと思われる。従ってこれらの影響を検討するためには他の地域に関するデータと比較する必要がある。また、当該する地域に適する評価方法を用いることも重要である。いずれにしても本論文の結果はある程度妥当な結果を示しているものと思われる。

アメリカにおけるAASHTOのPONTISによる評価方法⁵²⁾やCaltransの橋梁健全度指数による評価方法⁵³⁾においては、橋梁の社会資産としての評価価値に基づく評価方法を用いている。これらの評価方法を我国に導入するためには、橋梁の各部材の資産価値の評価など検討する課題が多く、今後の検討事項と考えている。

謝辞：本研究では非常に多くの機関、方々に研究に対する御理解と御協力を頂きました。ここにお名前を掲載させて頂き、感謝の意を表します。

北海道開発局道路維持課、建設機械工作所、開発土木研究所、網走開発建設部、その他アンケート調査にご協力頂いた多くのエキスパートの方々。また6章の解析においては太平洋総合コンサルタントの平成晴氏のご協力をいただきました。

また本論文を取りまとめる過程で、AASHTO やニューヨーク市の評価方法及び Caltrans における最近の評価方法などについてニューヨーク市の B.S.Yanev 博士及び Caltrans の P.K.Hipley 氏、M.B.Johnson 氏により有益なアドバイスを頂きました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.1-10，1994.10.
- 2) 建設省土木研究所：橋梁点検要領（案），土木研究所資料，第2651号，1988.
- 3) 佐藤弘史：橋梁マネージメントシステム，土木学会誌，pp.44-45，Vol.85，No.2，2000.2.
- 4) 佐藤弘史，萩原勝也：橋梁マネージメントシステム，土木技術資料，38-1，pp.38-43，1996.
- 5) 土木学会：鋼橋における劣化現象と損傷の評価，鋼構造シリーズ7，1996.
- 6) 森弘，大島俊之，三上修一，他：コンピュータ・グラフィックスと数量化理論を応用した橋梁の維持点検評価法，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.113-121，1994.10.
- 7) 森弘，大島俊之，三上修一，他：橋梁の健全度診断における総合評価法の開発，鋼構造年次論文報告集，Vol.1，1993.
- 8) 東京都建設局：橋梁点検要領，1988.3.
- 9) 古田均，他著：ファジィ理論の土木工学への応用，森北出版，1992.
- 10) 三上市蔵，他：鋼橋疲労損傷の補修方法選定システムにおける知識の再利用，構造工学論文集，Vol.38A，1992.
- 11) 宮本文穂，河村圭，中村秀明：Bridge Management System (BMS) を利用した既存橋梁の最適維持管理計画の策定，土木学会論文集，No.588/VI-38，pp.191-208，1998.3.
- 12) 宮本文穂，串田守可，足立幸郎，松本正人：Bridge Management System (BMS) の開発，土木学会論文集，No.560/VI-34，pp.91-106，1997.3.
- 13) 宮本文穂，串田守可，森川英典，木下和哉：コンクリート橋診断ニューロ・ファジィエキスパートシステムの開発と信頼性の向上，土木学会論文集，No.510/VI-26，pp.91-101，1995.3.
- 14) 安田登，白木渡，松島学，堤知明：ニューラルネットワークに基づいたコンクリート構造物点検技術者の思考過程の評価，土木学会論文集，No.496/V-24，pp.41-49，1994.8.
- 15) (財) 鉄道総合技術研究所：鋼構造物補修・補強・改造の手引き，1992.
- 16) 阪神高速道路管理技術センター：阪神高速道路における点検マニュアル，1992.
- 17) 阪神高速道路公団：道路構造物の点検標準（土木構造物編），1992.
- 18) 北田，関，他：都市高速道路網における鋼橋の耐用年数とトータルコストに関する一試算，構造工学論文集，Vol.41A，1995.3.
- 19) M.P.Enright，D.M.Frangopol：Condition Prediction of Deteriorating Concrete Bridges using Bayesian Updating，*Journal of Structural Engineering*，Vol.125，No.10，1999.
- 20) P.C.Das：New Developments in Bridge Management Methodology，*Structural Engineering International*，vol.，No.4，1998.
- 21) OECD：*Bridge Management*，Road Transport Research，1992.
- 22) AASHTO：*Manual for Condition Evaluation of Bridges*，1994.
- 23) AASHTO：*AASHTO Guide for Commonly Recognized (Co Re) Structural Element*，1997.12.
- 24) FHWA：*Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges*，Report No.FHWA-PD-96-001，1995.
- 25) Caltrans：*Element Level Inspection Manual*，Office of Structures Maintenance and Investigations，1998.6.
- 26) Caltrans：*ABME Structure Maintenance Procedures*，Office of Structures Maintenance and Investigations，1995.1.
- 27) New York State：*Condition Assessment*，New York State Bridge Management System.
- 28) NY-DOT：*Bridge Inspection Manual*，State of New York，Department of Transportation，1997.
- 29) B.S.Yanev：Infrastructure management System applied to bridges，Operation and Maintenance to Large Infrastructure Projects，Vincenten and Jensen (eds)，1998.
- 30) B.S.Yanev：The management of Bridges in New York City，*Engineering Structures*，Vol.20，No.11，pp.1020-1026，1998.
- 31) W.R.Hudson，R.Hass，W.Uddin：*Infrastructure Management*，McGraw-Hill，1997.
- 32) D.M.Frangopol：Bridge Safety and Reliability，ASCE，1999.
- 33) 土木学会：Intelligent Bridge / Structure and Smart Monitoring に関する公開講演会論文集，構造工学技術シリーズ No.12，1999.
- 34) 大橋，青山：土木計画への数量化理論Ⅱ類適用の信

- 頼度に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.353/IV-2, pp.67-74, 1985.1.
- 35) 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会: 北海道における鋼道路橋の設計および施工指針, 1995.12.
- 36) 松井繁之, 前田幸雄: 道路橋RC床版の劣化度判定法の一提案, 土木学会論文集, No.374号/I-6, pp.419-426, 1986.10.
- 37) 北海道開発局道路計画課: 全国道路交通情勢調査, 1996.1.
- 38) 田中, 垂水, 脇本: パソコン統計解析ハンドブックⅡ多変量解析編, 共立出版, 1984.
- 39) 寺野, 浅居, 菅野: ファジィシステム入門, オーム社, 1987.
- 40) 白石成人, 古田均, 橋本光行: ファジィ多基準分析に基づく構造物の健全度評価, システムと制御, Vol.28, No.7, pp.475-482, 1984.
- 41) 浅居, 田中, 和多田, 西岡, 白澤: ファジィ数量化理論Ⅱ類によるボランティア意識の構造分析, 行動計量学, 11巻1号, 1983.
- 42) 建設省道路局: 道路防災総点検要領, 1996.
- 43) M.J.N.Priestley, F.Seible, G.M.Calvi: *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, Wiley Interscience, 1996.
- 44) 本間, 大島, 三上, 平井: 老朽構造物の残存寿命評価の研究, 土木学会北海道支部論文集, 第42号, pp.141-144, 1986.2.
- 45) 平, 本間, 村上, 三上, 大島, 丹波: 橋梁点検評価システムとその改良, 土木学会第53回年次学術講演会, I-A, pp.530-531, 1998.9.
- 46) 平, 丹波, 工藤, 東海林, 三上, 本間: 耐震性を考慮した橋梁健全度診断評価の検討, 土木学会第54回年次学術講演会, I-A221, pp.442-443, 1999.10.
- 47) 丹波, 三上, 平, 大島, 山崎, 佐生: ファジィ数量化理論Ⅱ類による橋梁健全度診断評価の改良, 第54回年次学術講演会, I-A224, pp.448-449, 1999.10.
- 48) 平, 大島, 三上, 本間, 村上, 水元: 橋梁の健全度診断評価システムの開発, 土木学会北海道支部論文報告集, 第54号, pp.276-279, 1998.2.
- 49) 平, 佐生, 丹波, 大島, 三上: 全道橋梁の耐震性能を含む健全度診断評価, 土木学会北海道支部論文報告集, 第55号, pp.340-345, 1999.2.
- 50) 丹波, 大島, 三上, 山崎, 本間, 平: ファジィ数量化理論Ⅱ類の橋梁健全度診断評価への応用, 土木学会北海道支部論文報告集, 第55号, pp.334-339, 1999.2.
- 51) 丹波, 大島, 本間, 三上, 工藤, 平: 橋梁健全度評価の重み係数値に及ぼす影響因子の解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 第56号, pp.172-175, 2000.2.
- 52) P.D.Thompson, E.P.Small, N.Johnson, A.R.Marshall: The AASHTO Ware Pontis Bridge Management System, *Technical Report*, Caltrans, 1999.
- 53) R.W.Shepard, M.B.Johnson: California Bridge Health Index -IBMC-005, *Technical Report*, Caltrans, 1999.

(2000.3.23 受付)

INVESTIGATION OF TOTAL EVALUATION METHOD ON BRIDGE INTEGRITY AND ANALYSIS OF ITS EFFECTIVE CONSTITUENTS

Toshiyuki OSHIMA, Syuichi MIKAMI, Tomoyuki YAMAZAKI, Ikue TAMBA

Bridge inspection and its integrity evaluation are dealt with in this paper as a part of bridge management system (BMS). Weighted average method using the database of inspection on bridge is used to evaluate the total integrity of a bridge.

Analysis of damage causes on bridge members and effects of natural and traffic environment are not be neglected and those effects are taken into account. And scattering effect of expert's general decision and total integrity evaluation including seismic performance are also analyzed in this paper.

