

AHP を用いた橋梁補修計画支援システムの構築に関する一考察

Consideration on Applicability for Bridge Management System with Analytic Hierarchy Process

北海道大学大学院工学研究科 正 員 小幡卓司 (Takashi Oabta)
 北海道大学工学部土木工学科○学生員 木村竜太 (Ryuta Kimura)
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川俊郎 (Toshiro Hayasikawa)
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 佐藤浩一 (Koichi Sato)

1. まえがき

我が国において、交通社会資本の整備は、高度成長期、すなわち昭和40年～50年代に数多く施されてきた。従来の基盤整備では、効率性よりも必要性が求められ、投資効率が問題になることはほとんど皆無であったが、近年の投資余力の減少、また将来にわたる我が国の経済状態、産業や生活を取り巻く環境等を考慮すれば、新たな道路ネットワークの形成を目指すような開発的資本投資は極めて困難であり、既設の交通社会資本の有効利用・維持管理は今後ますます重要視されるであろう。

このような状況の中で橋梁構造物に着目すれば、予想外の交通量の増大、あるいは車両の大型化等の影響を強く受け、種々の損傷が数多く発生している可能性が極めて大きいと考えられる^{1),2)}。今後ますます増大するこの種の橋梁を全て掛け替えることは、上述のような理由から物理的に不可能であり、今後は維持管理を強化し必要に応じて補修を行うことにより、橋梁の長寿命化を目指すことが重要な課題になるものと考えられる。よって、橋梁の損傷度・健全度等に基づいた補修計画の意志決定が問題となることは明らかであると思われるが、特別な知識等を必要とせずとも簡便に判定が可能となるような手法を早期に確立することが新たな課題である。

一方、意志決定法の一つとして階層分析法 (Analytic Hierarchy Process, 以下 AHP と称す) が近年注目されている³⁻⁷⁾。この AHP は、解決すべき問題、評価基準、代替案を基本とした階層構造に基づいて重み付けを行い、最も優先度の高い順に比較することが可能となるような手法である。

そこで著者らは、橋梁補修計画への AHP の適用性と妥当性を検討するため、鋼桁橋の上部工について解析を行った^{8),9)}。本研究においては、まず上部工に関しては合成桁橋、非合成桁橋を厳密に区別し、さらに下部工を加えた橋梁システム全体を対象として、橋梁補修計画支援システムを構築することを目的とする。具体的には、建設省土木研究所、橋梁点検要領 (案) 等^{10),11)}に基づいて AHP における階層図を作成し、アンケート調査を実施することにより各項目に対するウエイト付けを行った。さらに、実橋点検データを用いて橋梁の損傷に応じた順位を算出し、本支援システムの妥当性、有効性等に関して考察を試みた。したがって、本研究はこれらの結果を報告するものである。

2. 階層分析法 (AHP)

AHP は様々な問題の意志決定を行う手法のひとつである。通常、意志決定においては対象となる問題が存在し、最終的な選択となるべきいくつかの代替案、それを1つに絞り込むための評価基準を用いて比較を行うことにより、何らかの判断を行うものである。AHP においては、これらの「問題」・「評価基準」・「代替案」の関係を階層構造化して取り扱う。この階層構造の各項目に対し一対比較を実施して、各々の重要度 (以下ウエイトと称す) を算出し、個々の代替案における各ウエイトの積を求めることにより、比率尺度による評価を行うものである。

AHP における比例尺度の決定方法は、 n 個の評価項目 $I_1 \sim I_n$ が存在し、そのウエイトが $w_1 \sim w_n$ の場合、項目 I_i と I_j の一対比較値は式(1)で与えられる。

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \dots \dots \dots (1)$$

式(1)の要素毎の一対比較値を、階層図に応じて取りまとめたものを一対比較マトリックス A とおき、右側からウエイト・ベクトル $w^T = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ を乗じると、

$$Aw = \lambda_{\max} w \dots \dots \dots (2)$$

となる。式(2)から、ウエイト・ベクトル w は一対比較マトリックス A の固有ベクトルであり、 $\lambda_{\max}$ は A の最大固有値となっていることがわかる。よって、各評価項目の比較検討により一対比較マトリックス A が得られれば、その固有ベクトルを計算することによりそれらのウエイトを求めることができる。一般に、一対比較マトリックス A および式(2)において常に理想的な一対比較が行われるとは限らないため、AHP においては式(3)に示すような指標を用いて一対比較の整合性を判断する。

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \dots \dots \dots (3)$$

上式の指標 $C.I.$ は、整合度 (Consistency Index) と称され、一対比較マトリックス A が完全な整合性を有する場合は $C.I.$ 値はゼロとなる。通常、十分な整合性が得られているか否かの判断は、 $C.I.$ 値が 0.1 程度以下になることが求められ、不十分な場合には、再度一対比較の妥当性を検討する必要がある。AHP の主な特徴は、まず各評価項目間に対する整合性の検討が可能のため、全体の意志決定過程における判断が首尾一貫した解析が容易に行える点である。また、一対比較の評価に際してあいまいな評価を具体的に取り入れられることも挙げられる。この比較的あいまいな評価を、数値に変換する手法として定義された換算値が AHP には用意されている。これにより、さらに従来の理論に比して全体の意志決定過程における評価が容易になると考えられる。

一般的な AHP の解析手順は、まず対象となる問題から、上位のレベルにおける親要素および、それより下の子要素からなる階層図を作成する。次に、各レベルの要素に対し、親要素に関する一対比較を行ってマトリックス化し、最大固有値と固有ベクトルを求めてウエイトの算定と整合度を算出することにより、ウエイトの合成を実施して最終的な意志決定を行うものである。

3. 橋梁補修計画における AHP の適用

3. 1 階層図の作成

本研究における階層図は、建設省土木研究所による「橋梁点検要領 (案)」^{10),11)} および文献 12),13) 等に基づいて作成することとした。前述のとおり、本研究は鋼桁を有する橋梁全体を対象とするため、まず図-1 に示すように上・下部工に分類し、それぞれの要素に応じた損傷の種類を、さらに細分化することにより階層図を得た。上部工における階層図を図-2 に、その点検項目の一例として主桁一般部の親要素に対する子要素の分類を図-3 に、また下部工全体の階層図を図-4 に、沓座の親要素に対する子要素の分類を図-5 に示す。なお、レベル 4 における損傷の分類については、

実際に橋梁点検に用いられる主な損傷を取り扱っている。本研究では、これらの階層図を基本として、後述のアンケート調査によりウエイトの算定を行うこととした。

3. 2 アンケート調査による一対比較

AHP 適用の第 2 段階として、階層図に対応した各レベルにおける要素の一対比較値を得ることが必要である。そこで、北海道大学院工学研究科所属の学識経験者 5 名および橋梁設計に従事する技術者 27 名の計 32 名に橋梁の維持管理・長寿命化に関するアンケート調査を実施して、一対比較を行うための基礎的データを得た。アンケートの内容は、橋梁の長寿命化をコンセプトとして図-2～5 で示した各階層図に基づいて、各種の比較を行うものである。

具体的な実施方法は、図-6 のような記入方法を用いて 2 要素間の重要度をチェックすることで回答を得た。また、これらの集計方法は、AHP において一般的に定義された換算値を用い、 $a_{ij}=1/a_{ji}$ となるように数値化して全体の幾

何平均を求めることでウエイトを算出している。なお、上部工に関しては、階層図そのものは同様であるが、合成桁と非合成桁に区別して 2 種類の調査を行った。図-7 に上部工における合成桁と非合成桁の比較を、図-8 に下部工のレベル 4 におけるウエイトの比較を示す。

まず図-7 に着目すると、合成桁における床版の評価が、非合成桁に比して高くなっていることがわかる。すなわち、主桁の評価は両者とも他の部材に対して高くなっているものの、合成桁では床版と主桁が一体化して荷重を支持していたため、床版の評価が相対的に大きくなり、非合成桁では主桁のみが荷重を支持していることから床版のウエイトがやや小さくなったと考えられる。整合度 CI については、0.028~0.001 と一対比較の整合性の基準とされる値 0.1 を下回ったことから、ある程度一貫した評価が行われたものと判断できる。

次に、図-8 に関しては、学識経験者における橋脚の洗

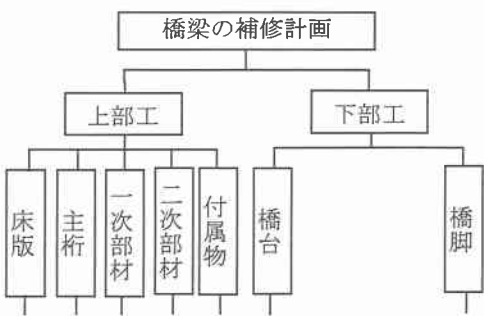


図-1 橋梁の補修計画階層図

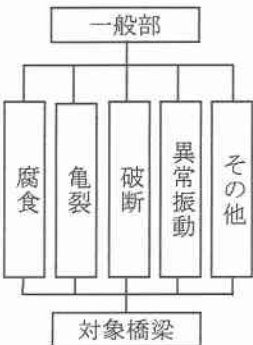


図-3 主桁一般部の親要素に関する子要素の分類

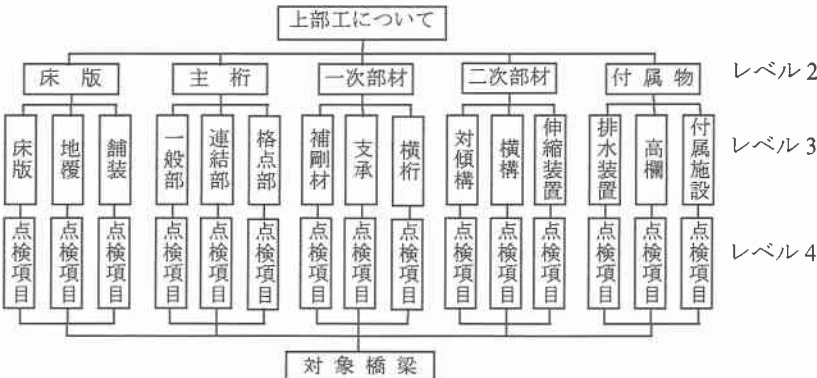


図 2-上部工全体における階層図

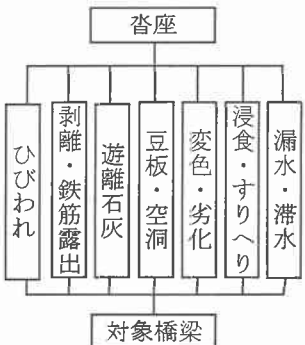


図-5 下部工沓座の親要素に関する子要素の分類

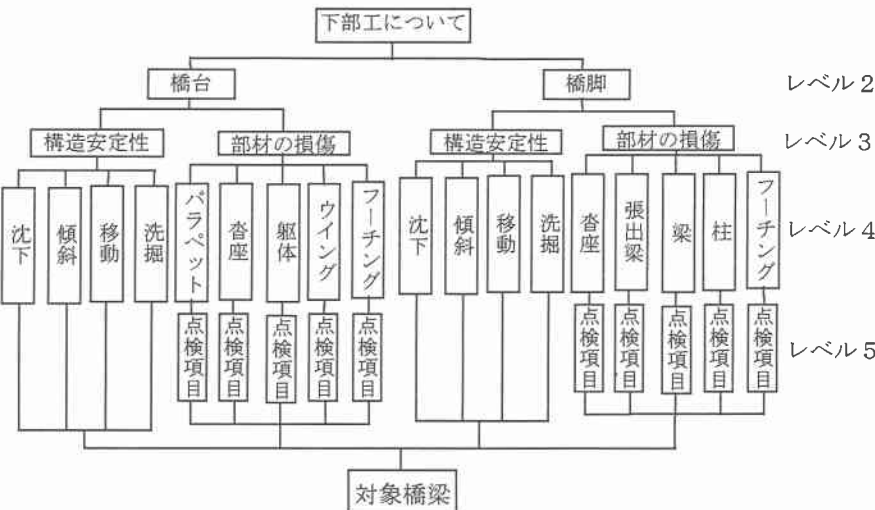


図4 下部工全体における階層図



図-6 アンケート記入方法

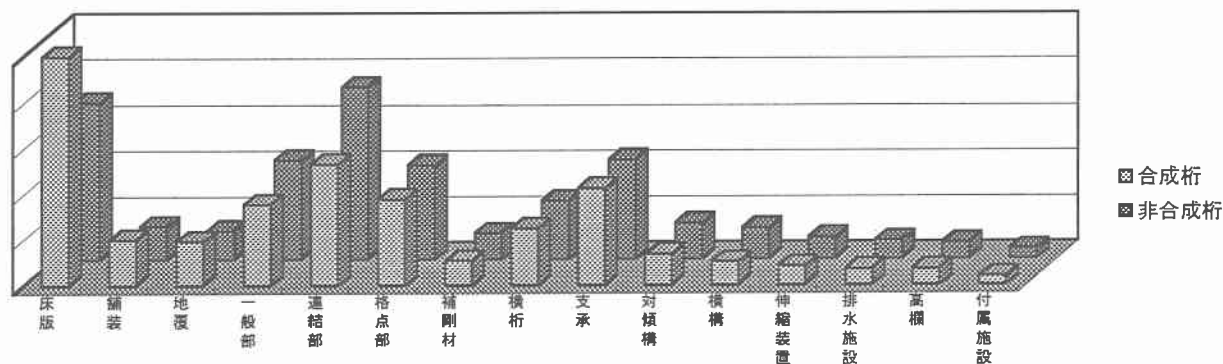


図-7 上部工における合成桁と非合成桁のウェイト比較

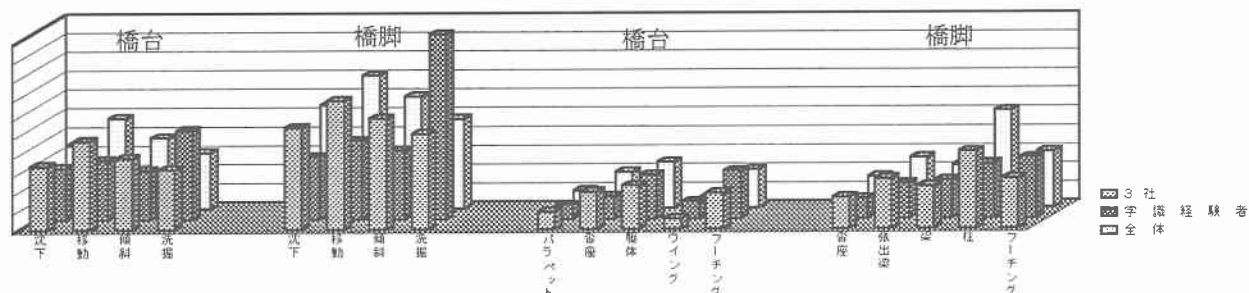


図-8 下部工におけるレベル4のウェイト比較

掘の評価が突出していることがわかる。これは、学識経験者の被験者数が少数であるため評価のばらつきが非常に大きくなったと推定される。しかしながら、その他の要素の相対的な順位付けは、技術者のアンケート結果とほぼ同様であると判断され、また C/I 値もすべてのケースにおいて 0.015~0.001 となり、比較的信頼性が高い回答が得られたものと考えられる。

さらに、アンケートにより得られた各損傷間の一対比較から、レベル4のウェイトを計算した。その結果については、床版におけるひび割れ、剥離・鉄筋露出、鋼板接着部損傷、主桁一般部における亀裂、破断等の損傷が大きな値を示し、高欄等の評価は非常に小さくなる傾向を示している。これは、前者が構造物に与える影響は高欄等の付属物よりも大きいことは容易に想像され、妥当な結果であると考えられることから、これを採用して維持補修に関する意志決定を試みることにした。

以上より、本研究では上部工と下部工の階層図を用いて、アンケート調査結果における被験者全体の平均値に基づいてウェイトを計算し、実際の橋梁点検データを代入することにより解析を行った。

4. 解析結果とその考察

以上の手法を用いて、本研究では AHP による橋梁補修意志決定に関して解析を行った。解析対象とした橋梁は、平成3年度橋梁点検において損傷が発見された北海道内の主要道道24橋のデータを用いることとした。表-1にこれらの橋梁における点検データを示す。表中の下部工におけるAおよびPは、それぞれ橋台と橋脚を意味している。なお、入力に際しては階層図の損傷要素と同様の項目が存在した場合は1、存在しない場合は0としてレベル4の各項目との積を合計することで総合ウェイトの算出を行い、損傷の程度に関しては、今回は特に考慮していない。解析結果として、図-9 および表-2 に総合ウェイトおよびその順位を示す。

まず、表-1 より上部工の損傷に着目すると、床版のひび割れや遊離石灰といった比較的ウェイトの高い項目が多く見受けられるのに対し、主桁には腐食や塗装劣化のようなウェイトの小さい損傷が多い傾向を有することがわかる。また、主桁の腐食に関しては橋梁全体に及んでいるケースが多く、このことによる総合ウェイトへの影響が注目される。次に下部工については、部材そのものの損傷は、

表-1 橋梁点検データ

	損傷(上部工)	損傷(下部工)
a橋	地覆(破損)・鋼主桁(塗装劣化)	支承モルタル(ひび割れ)A
b橋	床版(ひび割れ・遊離石灰)	支承モルタル(破損)・躯体(ひび割れ)
c橋	鋼主桁(塗装劣化)	抽換壁(洗掘)A・支承モルタル(破損)P
d橋	舗装(ひび割れ)・鋼主桁(劣化)・高欄(腐食)	躯体(ひび割れ)A
e橋	地覆(剥離)・鋼製高欄(腐食)	支承モルタル(ひび割れ)A・躯体(ひび割れ・遊離石灰)A
f橋	床版(剥離)	躯体(ひび割れ)A
g橋	床版(ひび割れ・遊離石灰)・地覆(剥離・鉄筋露出)	梁(ひび割れ・鉄筋露出)P
h橋	床版(ひび割れ・遊離石灰)	なし
i橋	排水施設(パイプ鏝)・床版(ひび割れ)・地覆(破損)・舗装(ポットホール)・高欄(変形)	フーチング(洗掘・鉄筋露出)P
j橋	地覆(ひび割れ)・床版(ひび割れ)	支承モルタル(破損)A
k橋	地覆(ひび割れ・鉄筋露出)・高欄(腐食)	躯体(ひび割れ)A・フーチング(洗掘・ひび割れ)
l橋	地覆(剥離)・鋼主桁(腐食)・橋梁全体(鏝)・支承(亀裂)	パラペット(剥離)・沓座(剥離)・躯体(剥離)A・躯体(破損)P
m橋	地覆(剥離・鉄筋露出)	躯体(剥離)A
n橋	床版(ひび割れ)・地覆(ひび割れ・鉄筋露出)排水施設(パイプはずれ・破損)	フーチング(鉄筋露出・ひび割れ)P
o橋	鋼主桁(塗装劣化)	支承モルタル(破損)A
p橋	舗装(ひび割れ)・床版(ひび割れ)	支承モルタル(破損)A
q橋	舗装(ひび割れ)	支承モルタル(破損)A・躯体(ひび割れ・剥離)P
r橋	舗装(ひび割れ・剥離)・床版(ひび割れ・剥離)・地覆(剥離)	躯体(剥離)A
s橋	地覆(ひび割れ)	沓座(ひび割れ)A
t橋	床版(ひび割れ・遊離石灰)・地覆(ひび割れ)・鋼製高欄(腐食)	支承モルタル(ひび割れ)A
u橋	鋼主桁(塗装劣化)・床版(遊離石灰)	躯体(ひび割れ)A
v橋	高欄(塗装劣化)・舗装(ひび割れ)	なし
w橋	床版(ひび割れ・遊離石灰)・舗装(ひび割れ)	パラペット(はずれ)A
x橋	高欄(腐食・欠損)・地覆(鉄筋露出)	フーチング(洗掘)P

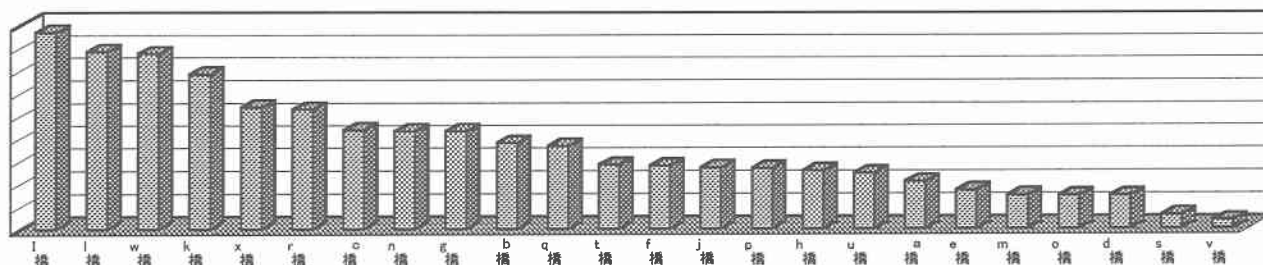


図-9 総合ウエイト、順位

表-2 総合ウエイト、順位

順位	橋梁	総合ウエイト	順位	橋梁	総合ウエイト
1位	i橋	0.0868	13位	f橋	0.0276
2位	l橋	0.0782	14位	j橋	0.0268
3位	w橋	0.0773	15位	p橋	0.0266
4位	k橋	0.0682	16位	h橋	0.0254
5位	x橋	0.0539	17位	u橋	0.0244
6位	r橋	0.0528	18位	a橋	0.0206
7位	o橋	0.0436	19位	e橋	0.0169
8位	n橋	0.0429	20位	m橋	0.0147
9位	g橋	0.0429	21位	o橋	0.0145
10位	b橋	0.0376	22位	d橋	0.0144
11位	q橋	0.0362	23位	s橋	0.0059
12位	t橋	0.0281	24位	v橋	0.0036

支承の破損や躯体のひび割れといった比較的ウエイトの低いものが多く、全体の順位付けには大きな影響を及ぼさないと推定されるが、洗掘といった構造安定性に関する問題は、大きなウエイトを有することから、順位付けへの影響は多大であると思われる。これらを踏まえて図-9に着目すると、上位のi橋は上部工においてウエイトの比較的高い床版全体に損傷が発生し、なおかつ下部工には洗掘が生じているため、もっとも大きい総合ウエイトが得られている。l橋においては、主桁全体に腐食が及んでいることから、腐食単体としてのウエイトそのものは比較的低いものの、主桁全体に腐食が進むことによって多数の要素が総合ウエイトに加算され、結果的に評価が大きくなったと考えられる。以上より、各橋梁が有する損傷状態から検討を加えれば、極めて明確な順位付けがなされていると判断でき、本研究の解析結果はほぼ妥当であると思われる。また、具体的な数値で重要度を計算できることから、単なる順位のみならず、各順位間の差がどの程度であるかを容易かつ簡便に検討することが可能である。これは、評価の過程あるいは判断基準等を明確にする必要性を有する際に大きな効力を発揮すると考えられ、したがって、このような橋梁補修計画における意志決定支援のためのAHPの適用は、極めて高い可能性を有するものと判断される。

5. あとがき

以上のように、本研究は橋梁の補修計画における意志決定支援の一手法であるAHPの適用性、有効性等を検討することを目的として、鋼桁橋の補修計画における損傷度評価に関する階層図を構築し、アンケート調査による一対比較の結果から実橋の点検データに対する損傷度の評価を行ったものである。

まず、AHPにおける階層図の構築ならびに各項目間の一対比較に関しては、橋梁設計技術者等からの情報を収集することにより、ある程度容易にこれらの構築が可能であることが判明した。したがって、本手法は比較的高い汎用性を有するものと推定される。

次に解析結果からは、上・下部工を含めた橋梁システム全体に対する評価にもかかわらず、実橋点検データに対して妥当と考えられる順位付けが得られた。一般に、上部工・下部工のような、構造特性あるいはその性質が異なる構造物を総合的に評価することは困難であると思われるが、AHPにおいては妥当な階層図、あるいはウエイト付けがなされれば、十分に有効な解析が可能であると判断される。また、具体的な重要度が数値で示されることから、評価の過程、あるいは判断基準等を明確にする必要性が大きいと考えられる橋梁補修計画における意志決定支援問題に対しては、極めて高い可能性を有するものと考えられる。よって、階層図の設定やウエイトの算定方法等に改善の余地はあるものの、このような問題に対するAHPの適用性は非常に優れているものと思われる。

今後の課題としては、今回は取り扱わなかった損傷の程度やライフサイクルコスト等を考慮した経済的側面等を

含めた解析を行う必要を有するものと考えられる。

最後に、アンケート調査にご協力頂いた開発工営社(株)、(株)シー・イー・サービス、北武コンサルタント(株)の方々に対し、ここに記して深い謝意を表す次第である。

【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.
- 2) 鋼構造委員会 鋼橋の余寿命評価小委員会：鋼橋の劣化現象と損傷の評価，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.21-36，1994.
- 3) 古川浩平，古田均，仁多和英：一対比較法之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.
- 4) 中村秀治，松浦真一，寺野隆雄，篠原靖志：水力鋼構造物の寿命予測エキスパート・システムとその適用，土木学会論文集，第374号/I-6，pp.513-521，1986.
- 5) 刀根薫：ゲーム感覚意志決定法-AHP-入門，日科技連出版社，1990.
- 6) 刀根薫，眞鍋龍太郎：AHP事例集，日科技連出版社，1990.
- 7) 木下栄蔵：わかりやすい意志決定論入門-基礎からファジィ理論まで-，近代科学社，1996.
- 8) 小幡卓司，濱木道大，林川俊郎，佐藤浩一，松井義孝：橋梁補修計画の意志決定問題に関するAHPの適用性について，土木学会北海道支部論文報告集，第56号(A)，pp.176-181，2000.
- 9) 小幡卓司，濱木道大，林川俊郎，佐藤浩一，宮森保紀：鋼桁橋の維持補修計画支援におけるAHPの適用性について，鋼構造年次論文報告集，第8巻，2000.
- 10) 建設省土木研究所：橋梁点検要項(案)，土木研究所資料，第2651号，1998.
- 11) 北海道開発局道路維持課：道路橋の点検および補修・補強設計施工要領(案)，1998.
- 12) 森弘，大島俊之，三上修一，天野政一，井上実：コンピューター・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.
- 13) 大島俊之，森弘，三上修一，本間美樹治，阿部英俊：数量化理論による橋梁の健全度評価の実用化に関する検討，土木学会北海道支部論文報告集，第51号(A)，pp.310-313，1995.