

橋梁点検データと意識調査に基づいた劣化順位決定手法に関する一考察

Consideration of decision-making process of bridge damage based on bridge inspection data and questionnaire investigation

小幡 卓司*, 井田俊輔**, 宮森保紀***, 林川俊郎****, 佐藤浩一*****

Takashi Obata, Syunsuke Ida, Yasunori Miyamori, Toshiro Hayashikawa and Koichi Sato

*工博 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

**工学士 北海道大学大学院博士前期課程 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

***工博 九州大学大学院助手 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

****工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

*****工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

The life extension improvements of infrastructures are very effective for economic condition, decrease of earth environmental impact and so on. Also the maintenance and rehabilitation planning are very important problem for long-lived active use of bridge structures. For realization of bridges life extension, it is necessary to apply an efficient decision-making support technique on bridge management.

In this study, the decision-making process is used analytic hierarchy process (AHP) for investigate the bridge damage from bridge inspection data. The questionnaire investigations are performed on bridge design engineers and bridge administrators for AHP system, and decisions of the bridges damage level ranking analyses are performed from real inspection data. The possibility of application of AHP and effectiveness of bridge damage ranking process in this study are discussed from these results.

Key words : decision-making process, bridge damage, steel girder bridge, AHP

キーワード: 意思決定支援, 劣化度, 鋼桁橋, 階層分析法

1. まえがき

わが国における交通社会資本の整備は、昭和40年～50年代のいわゆる高度経済成長期に数多く行われ、その充実も図られてきた。それから約30年経った今日では、基盤施設の年齢は壮年期を迎えつつあると言われており、これらの構造物の老朽化は、このまま無対策で経緯すれば急速に進むことが予測されている。しかしながら、近年における市民意識の向上により、資本投資に対する効率性や環境への影響等に関する関心の高まりや、投資余力そのものの減少から、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ることから、既設の交通社会資本の有効利用・維持管理が今後ますます重要視されることは自明である。このような社会情勢の中で、橋梁構造物における現況に着目すると、車両の大型化、予想外の交通量の増大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高いと考えられる^{1),2)}。よって、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であるが、対象となる橋梁構造物の補修に至る意思決定のプロセスを、明確に示す必要があるものと思われる。すなわち、上述のように市民の意識向上に伴う説明責任に十分対応可能であり、かつ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。

このような背景のもと、数々の橋梁補修計画支援手法が提案されている。まず、大島らは、橋梁の健全度評価診断を目的とし、数量化理論Ⅱ類、ファジィ数量化理論ならびに橋梁点検データ等を用いて各部位の重み付けを行い、橋梁健全度のランク付けを行った。また、交通量や気温、積雪量等の橋梁健全度に影響を与える二次的因子の選定

と、重み係数決定に関する解析を行い、北海道のような寒冷地における橋梁健全度への影響を検討した^{3),4)}。

山岡らは、劣化診断機能、劣化予測機能、維持管理計画最適化機能などを有した包括的な橋梁維持管理システムを開発しその実用性、適用性の検討を専門技術者の目視点検およびアンケート調査から行うとともに、実用性の向上のためにデータの蓄積を行っている⁵⁾。

白倉らは、FSM法から構造物維持管理支援システムにおける階層構造モデルを視覚的に表示するシステムを構築し、構造物維持管理支援システムへの統合を図ることによって、モデル構築、点検、診断の一連の作業とモデルの再構築に対応した、より高度なシステムの構築を行った⁶⁾。

森らは、数量化理論を専門家のアンケート結果に応用して橋梁の損傷度を評価し、コンピューター・グラフィックスを用いて可視化することによって視覚的に判断するシステムの開発を行った。この研究では、機能的評価と物理的評価を総合して橋梁の健全度を検討している。これにより機能的因子と物理的因子の、相対的重み比率の決定を可能にしたことが大きな特徴である⁷⁾。

他にも、一定予算内で最大の効果をもたらす補修対象橋梁と補修部位の組み合わせ最適化問題をGAを用いて解析を行った近田の研究⁸⁾や、最近では同様にGAを適用した古田の研究⁹⁾が知られている。

この種の意思決定手法の過程において、しばしば問題になるのが個々の事象に対する重み付けや、全体における判断基準等の一貫性である。一般に、意思決定の過程がそれほど複雑でない場合はこれらの首尾一貫性は比較的容易に検討可能であるが、検討項目が増大し、その計算過程が複雑化すると、隣接する項目間における整合性はともかくも、全体における整合性に矛盾を来す場合もしばしばあることが知られている。近年、このような意志決定法の1

つとして階層分析法 (Analytic Hierarchy Process, 以下 AHP と称す) が注目されている^{10~14)}。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うことにより、最も優先度の高い順に具体的な数値によって比較することが可能であり、整合度 C.I. (コンシステンシー指数、Consistency Index) と称される値を用いて、重み付けを行う一対比較の首尾一貫性の検討も可能となるような手法である。

以上を踏まえて、本研究では、上部構造ならびに下部構造における橋梁システム全体を対象として、道路管理者および実務技術者の双方に対して、橋梁の維持管理に関する意識調査を実施し、AHP を用いてこの調査結果を反映した上で、橋梁点検データに基づいた劣化順位決定の支援が可能となるような手法の検討を行うことを目的とする。具体的には、上部構造は鋼桁橋を、下部構造はコンクリート構造を対象として、旧国土交通省土木研究所、橋梁点検要領(案)等^{15),16)}に基づいて AHP における階層図を作成し、道路管理者、実務技術者へアンケート調査を実施することにより、両者の橋梁の維持管理あるいは補修・補強に関する意識の共通点・相違点等に関して検討を行った。次に、上記の結果を踏まえて、アンケート調査結果を数値化して階層構造の各項目についての一対比較を行って C.I. 値を算出することにより、階層構造全体の整合性あるいは首尾一貫性を維持できるような各項目に対する重要度(ウエイト)を求めた^{17),18)}。さらに、構築された支援システムに実橋点検データを入力し、橋梁の損傷状態に応じた劣化の順位を算出し、その妥当性、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. 解析方法

2. 1 階層分析法 (AHP)

現在、様々な意思決定問題を数学的に解析し、客観的に正しいと考えられる判断を下すために数多くの手法が研究されており、AHP はその一手法として注目されている^{10~14)}。

一般に、意志決定プロセスにおいては初めに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がある。この両者の間に、代替案を一つに絞り込むためのいくつか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」の関係を階層構造に表現することによって取り扱う。この階層構造の各項目に対し一対比較を実施して、それぞれの重要度(以下ウエイトと称す)を算出して重み付けを行い、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 における比率尺度の求め方は、例えばここに n 個の評価項目 $I_1 \sim I_n$ が存在し、そのウエイトが $w_1 \sim w_n$ と仮定した場合、項目 I_i の I_j に対する重要度の一対比較値は式(1)で与えられ、全体の一対比較マトリックス A は式(2)のようになる。

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

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

表-1 重要度の換算値と定義

換算値	定義
1	同じくらい重要 (equal importance)
3	やや重要 (weak importance)
5	かなり重要 (strong importance)
7	非常に重要 (very strong importance)
9	絶対重要 (absolute importance)

ここで、式(2)の右側からウエイト・ベクトル $w^T = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ を乗じると、

$$Aw = \lambda_{\max} w \quad (3)$$

となる。式(3)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、 n は A の最大固有値 $\lambda_{\max}$ となっていることがわかる。よって、各評価項目間の比較検討により一対比較マトリックス A を求められれば、その固有ベクトルを計算することにより各評価項目のウエイトを得ることができる。一般に、式(2)、(3)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(4)のような指標を用いて一対比較の整合性を検討する。

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

上式の指標 C.I. は、AHP において整合度(コンシステンシー指数、Consistency Index)と呼ばれ、完全に整合性を有する一対比較が行われた場合には、C.I. は 0 となる。通常、一対比較マトリックスにおいて十分な整合性が得られているか否かの判断には、C.I. 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し、一対比較マトリックスを変更する必要がある。AHP の特徴は、各評価項目間に対する整合性の検討が可能のため、従来のこの種の理論と比較して、全体の意思決定過程において首尾一貫した判断のもとに解析が行える点である。また、一対比較におけるあいまいな評価を具体的な数値として取り入れられる点がある。AHP には、この比較的あいまいな評価を具体的に数値化する手法として、表-1 に示されるような重要度の定義と換算値が用意されている。

以上の特徴から、従来の理論に比して全体の意思決定過程における評価、あるいは数値化に際しての妥当性の検討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に応じて、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適切な階層図を作成する。次に、各レベルの個々の要素に対し、親要素に関する一対比較を実施してマトリックス化を行う。得られた一対比較マトリックスより、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し、この値が 0.1 以下になるまで繰り返す。さらに、階層に基づいたウエイトの合成を実施して最終的な意思決定を行うものである。

2. 2 階層図の作成

本研究における階層図は、旧国土交通省土木研究所による「橋梁点検要領(案)」および北海道開発局道路維持管理課による「道路橋の点検および補修・補強設計施工要領(案)」等に基づいて作成することとした^{3),7),8~11)}。本研究では、鋼桁を有する橋梁全体を対象とするため、図-1 に示すようにまず上部工・下部工に分類し、それぞれの要素に応じた損傷の種類を部材の材質・特性等に応じて細分化することにより階層図を得た。ここで、上部構造のレベル 2 において、一般的な部材の分類とは一部異なるものが見受けられるが、これは予備的な解析の結果、各レベルにおい

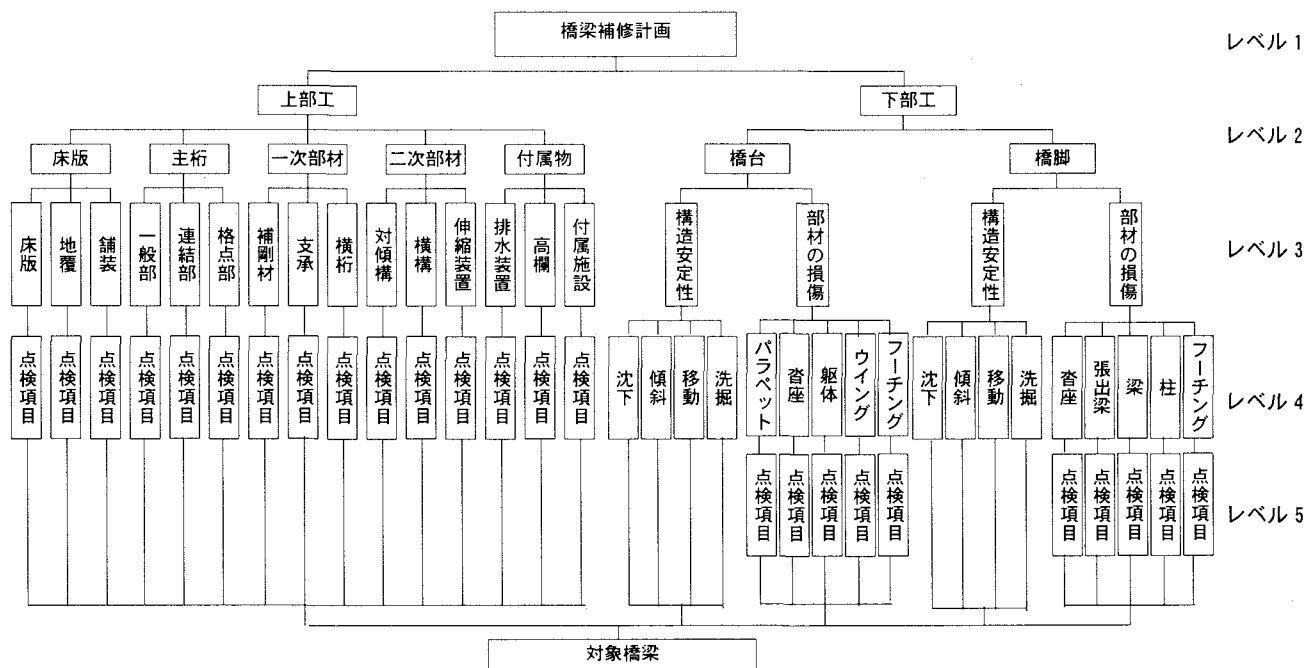


図-1 階層図（全体図）

て比較する項目数に差異が生じると、それに応じて整合性のとれた一対比較が困難となり、最終的な順位判定に偏りが生じる傾向が見られたため、維持管理上の重要性を考慮して、各レベルの項目数が同一となるように便宜的に配分したものである^{17),18)}。図-1の階層図では、例えば一次部材に支承が、二次部材に伸縮装置が含まれているが、これらは損傷を受けると橋梁の機能そのものに影響を及ぼし易い部材と考えられ、一般の分類よりも高いランクに配置することとした。

また、上部構造のレベル4との下部構造のレベル5における点検項目の損傷の種類については、上述の文献16)によって定義され、実際に橋梁点検に用いられている、表-2のような損傷を取り扱っている。具体的な構造要素に対する点検項目の選定は、前述の通り上部構造は鋼桁を、下部構造はRCを想定しているため、それぞれの材質と構造部材の特性に応じて配置することとした。点検項目の階層図の一例として上部構造の主桁一般部の親要素に対する子要素の分類を図-2に、また下部構造の沓座の親要素に対する子要素の分類を図-3に示す。

なお、本研究において表-2のような損傷の分類を用いた理由として、まず現実に行われている橋梁点検は、文献15),16)等に基づいて行われることが多いと考えられ、得られるデータそのものも表-2の分類となっているケースがしばしば見受けられることが挙げられる。また、橋梁点検には5年間隔程度で比較的大規模に行われる定期点検や災害時に行われる緊急点検の他にも、構造物に限らず道路の保全のために行われる通常点検が日常的に実施されている。この通常点検も、一般的には表-2の損傷に着目した上で、目立つ問題があれば記録するような手法が用いられていることから、詳細な点検を実施せずとも、通常点検のレベルでもある程度の検討が可能となること等が考えられる。以上より、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出を行うこととした。

2. 3 橋梁の維持管理等に関する意識調査

劣化順位の判定支援プロセスにおいて意思決定過程にAHPを適用するためには、階層図に対応した各レベルに

表-2 橋梁における損傷の種類

材料	No.	損傷
鋼	(1)	腐食
	(2)	亀裂
	(3)	ゆるみ
	(4)	脱落
	(5)	破断
	(6)	塗装劣化
コンクリート	(7)	ひび割れ
	(8)	剥離・鉄筋露出
	(9)	遊離石灰
	(10)	豆板・空洞
	(11)	すりへり・侵食
	(12)	抜け落ち
	(13)	鋼板接着部の損傷
	(14)	床版ひび割れ
その他	(15)	遊間の異常
	(16)	段差・コルゲーション
	(17)	ポットホール
	(18)	舗装ひび割れ
	(19)	わだち掘れ
	(20)	その他
共通	(21)	変色・劣化
	(22)	漏水・滞水
	(23)	異常音
	(24)	異常振動
	(25)	異常たわみ
	(26)	変形
	(27)	土砂詰まり
	(28)	沈下
	(29)	移動
	(30)	傾斜
	(31)	洗掘
	(32)	欠損

コルゲーション：舗装の波打ち

ポットホール：舗装表面の局所的な小穴

における一対比較値を得ることが必要である。汎用的な橋梁補修計画支援システムの構築を目指すためには、様々な立

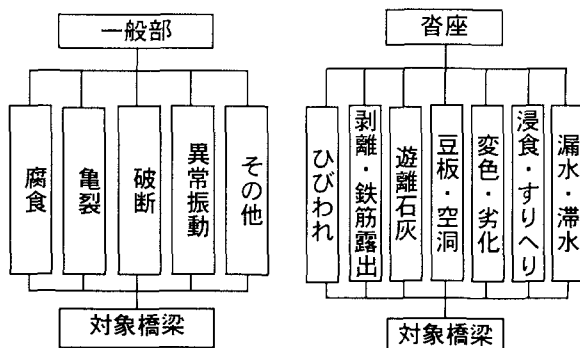


図-2 主桁一般部の子要素 図-3 下部工沓座の子要素

場からの維持補修に対する考え方のデータを得ることが望ましいと考えられる。すなわち、実際に橋梁を管理する国や地方自治体に所属する技術者の立場と、実際に設計・施工等に從事する技術者ならびに学識経験者等において、橋梁の維持管理・補修補強に関する意識の共通点あるいは相違点を明確にした上で、これらの結果を意思決定支援に反映させることが可能となれば、汎用性の高いシステムの構築も十分行えるものと判断できる。

そこで本研究では、まず学識経験者および橋梁の一般・補修設計等に從事する技術者の計 32 名に橋梁の維持管理・長寿命化をコンセプトとした第 1 回目のアンケート調査を行った。次に、この第 1 回目調査の検討結果を踏まえて、調査項目に若干の変更を加え、実際に国道の維持管理に從事している道路管理者 48 名を対象に、2 回目のアンケートを実施した。

具体的なアンケートの実施方法は、図-1～図-3 に示した階層構造において、各レベルの要素について 2 項目を一对比較し、どちらがどの程度重要と思われるかを回答者が判断するような方法を用いている。アンケートの一例として、下部構造の沓座における点検項目の一对比較を図-4 に示す。本研究では、被験者 1 名当たりの回答数は 115 回となり、延べ回答数（データ点数）は合計 7854 回である。これらの定量化ならびに集計方法は、まず各項目の度数 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することとした。

アンケートに際しての趣旨説明は、アンケート用紙の表紙に調査の目的と方法を記入するとともに、別紙にて協力のお願いと本調査の趣旨の説明を行った。また、調査を実施した各事業体において窓口となって頂いた方々には、直接お会いして口頭にて説明を加えることで調査に関するご理解を深めて頂き、それぞれの事業体での実際の回答者の方への具体的な説明あるいは質問等に関して、ご対応頂くよう要請した。説明の内容は、文献 17) で予備的に行った調査の際に用いたものを基にしており、この時の回答を検討した結果、趣旨説明の不足等による顕著なばらつきは見られなかったことから、同様の方法を用いている。

なお、第 1 回目と第 2 回目調査の相違点は、1 回目においては上部構造について合成桁と非合成桁を厳密に分けて行ったのに対し、2 回目では特に区別せずにアンケートを実施した点である。その理由としては、合成桁と非合成桁においては主桁と床版のウエイトに若干の相違が見られるものの、他の要素と比較するとこれらのウエイトは非常に大きく、主桁、あるいは床版に損傷が発見された場合には、合成桁、非合成桁に関わらず補修順位は極めて高くなり、構造形式の差異はほとんど影響しないことが判明したためである。また、供用期間の長い橋梁においては設計図書が完備されていないことも多く、外観からは合成桁か

	絶対重要	非常に	やや	同等	やや	非常に	絶対重要
ひび割れ					○		剥離・鉄筋露出
ひび割れ			○				遊離石灰
ひび割れ			○				豆板・空洞
ひび割れ			○				すりへり・侵食
ひび割れ				○			劣化・変色
ひび割れ				○			漏水・滞水
剥離・鉄筋露出	○						遊離石灰
剥離・鉄筋露出		○					豆板・空洞
剥離・鉄筋露出		○					すりへり・侵食
剥離・鉄筋露出		○					劣化・変色
剥離・鉄筋露出		○					漏水・滞水
遊離石灰	○						豆板・空洞
遊離石灰				○			すりへり・侵食
遊離石灰				○			劣化・変色
遊離石灰					○		漏水・滞水
豆板・空洞				○			すりへり・侵食
豆板・空洞				○			劣化・変色
豆板・空洞				○			漏水・滞水
すりへり・侵食				○			劣化・変色
すりへり・侵食				○			漏水・滞水
劣化・変色					○		漏水・滞水

図-4 アンケート記入方法

非合成桁か判断が困難な場合もあり、実際の運用を考慮すると、これらを厳密に分けてもあまり効果的ではないと判断されることも一因となっている。

3. アンケート調査結果

以上のような手法を用いて、本研究では道路管理者・実務技術者の合計 80 名に対して橋梁の維持管理に関するアンケート調査を行った。度数分布の一例として、図-5 に上部構造のレベル 2 における床版と主桁の比較、ならびにレベル 3 の高欄・排水装置・付属施設についての結果を示す。なお、ここでは上部構造における合成・非合成桁の区別と、被験者間の差異を中心に検討を試みる。

3. 1 上部構造の分類による相違点

まず、図-5 の上部構造レベル 2 における床版・主桁の比較に着目すると、まず実務技術者の合成桁と非合成桁において若干のばらつきは見受けられるが、両者とも「同等」付近の回答が多く得られており、大きな差異は生じていないと思われる。すなわち、床版がやや重要、両者が同等および主桁がやや重要を選択した場合を考えると、合成桁で 60%、非合成桁で 46% となっており、非合成桁の方が主桁を重視する傾向はあるものの、約半数が同等程度と判断していることがわかる。また、道路管理者においても「同等」付近の回答が 46% であり、全体の傾向は非合成桁に近いが、床版が重要と考える人もある程度いることから、合成桁・非合成桁のほぼ中間的な回答が得られているものと判断される。加えて、この上部構造レベル 2 においては、後述

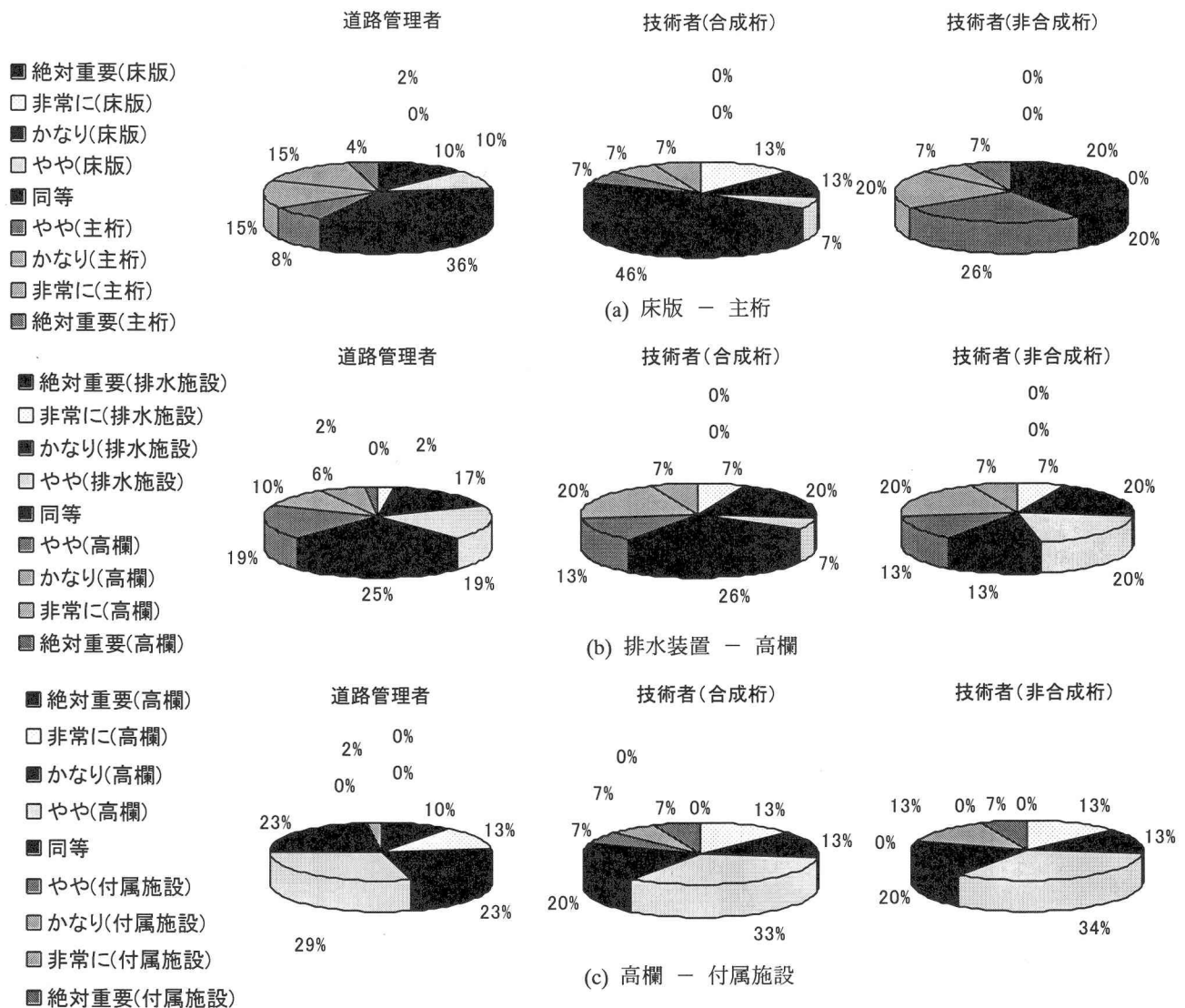


図-5 アンケート調査結果

の図-6のように、当然ながら床版、主桁が他の一次部材、付属物等の要素に比して、管理者、技術者共に‘かなり重要’‘非常に重要’と考える人が多い結果となっている。

以上より、たとえ合成桁と非合成桁を厳密に分類したとしても、床版・主桁に損傷が発見された場合は、補修順位あるいは損傷度は非常に高くなり、解析プロセスを複雑化する割には、あまり大きな意味を持たないと思われる。よって、このような補修支援システムにおいて上部構造の合成桁・非合成桁を厳密に区別する必要性はあまりないものと考えられる。

3. 2 被験者の立場による相違点

次に被験者の立場による相違点について考察を加える。図-5(b)および(c)の排水施設－高欄、高欄－付属施設の比較についての円グラフに着目すると、排水施設－高欄については道路管理者、実務技術者の間に顕著な差は見受けられないが、高欄－付属施設に関しては前者において高欄が重要と考える人が46%、後者では26%となっており、道路管理者が大きく上回る結果となっている。これは、道路管理の面から考えれば、車両や歩行者に対する安全性あるいは使用性を確保することは極めて重要であるため、管理者側の立場からは高欄が重要と評価する割合が大きくなったものと思われる。加えて、道路管理者のアンケートに対する意見として、高欄や照明等の付属施設は、使用性・

安全性の観点からはすぐに補修を行う性質のものであり、橋梁の長寿命化とは本質的には多少異なるとの指摘も受けたことから、これらの取り扱いには注意が必要であると思われる。

さらに、今回の調査における全体の傾向に言及すると、上述のようにいくつかの項目において道路管理者と実務技術者間にある程度の相違は生じており、意思決定過程においても有意な差が生じるであろうことが推定される。したがって、本研究ではこれらの差異を明確にするために、道路管理者、実務技術者の意識調査結果から個別に一对比較マトリックスを作成し、AHPにおけるウエイトの算出を行うこととした。

4. 劣化順位判定支援プロセスへのAHPの適用

4. 1 上部構造の重要度

本研究では、アンケート調査結果に基づき、AHPを用いて橋梁点検データから劣化順位を判定する手法について検討を行った。ここでは、特徴的な差異が生じたと考えられる項目を中心に、一对比較マトリックスから求められたウエイト（重要度）と整合度C.I値について考察を加えることとする。

図-6は道路管理者および実務技術者の合成・非合成桁についての上部構造のレベル3におけるウエイト比較であ

■実務技術者(合成) □実務技術者(非合成) □道路管理者

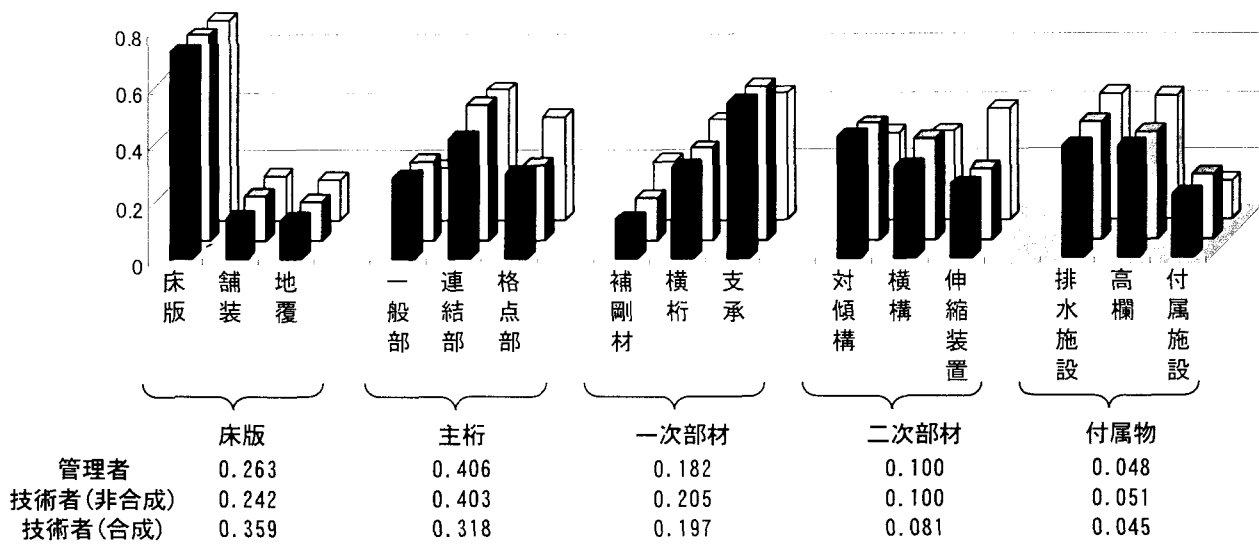


図-6 上部工レベル3におけるウエイト比較

■実務技術者(合成) □実務技術者(非合成) □道路管理者

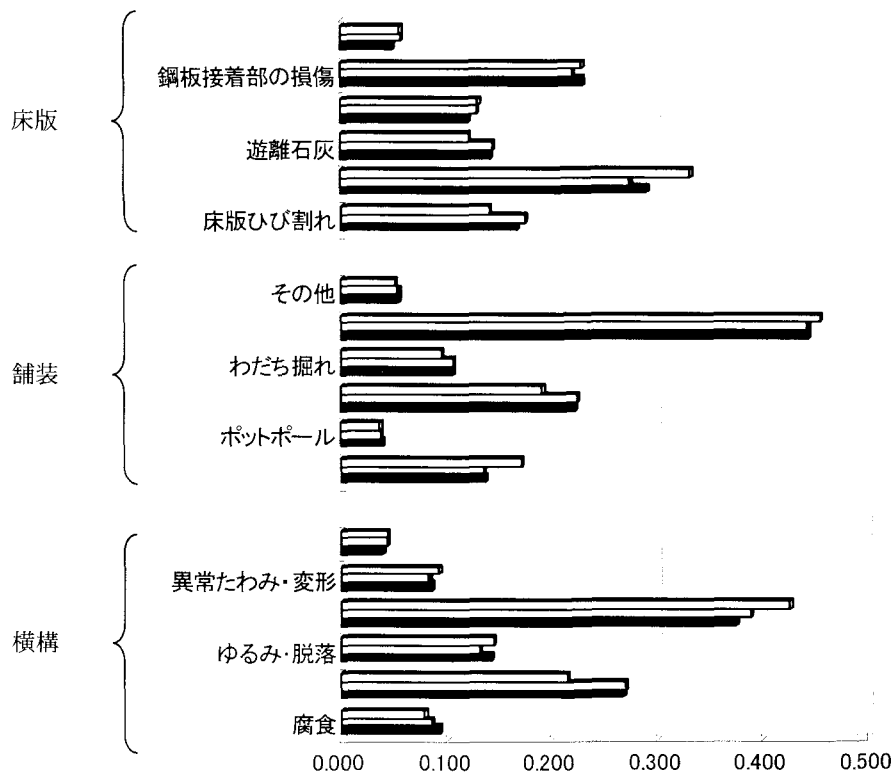


図-7 点検項目ウエイト比較例(上部構造)

る。図-6においては、各項目の下にそれぞれの属する親要素と、レベル2における親要素のウエイトを示してある。総合ウエイトは、各項目のウエイトと、親要素のそれを掛け合わせるにより得ることができる。

これらの要素のウエイトに関して検討を加えると、床版および主桁の子要素が非常に大きいウエイトとなっており、橋梁工学からは極めて常識的な結果となっている。また、C.I値は前述のとおり AHP において行った一対比較の

一貫性の整合性を表すために用いる指標であり、完全に整合性を有する一対比較が行われた場合には、C.I.は0となる。ここでの一対比較では0.0002~0.047とその整合性の基準となる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。

道路管理者と実務技術者の差異に関しては、上部工のレベル3においてはあまり大きくないと考えられるが、主桁の格点部、一次部材の支承、伸縮装置および高欄で有意と

思われる差が生じている。まず、格点部については、疲労に起因する損傷が比較的多く生じる部材であることが実際の橋梁点検等で確認されているため、より多くのデータを有する道路管理者においては一般の技術者よりもこの要素が重視されたと考えられる。

支承については、レベル3のみの範囲で比較すれば、主桁の一般部や格点部に匹敵するほどの高いウエイトを示している。阪神淡路大震災以前は、あまり重要視されていなかった支承も、この地震によって非常に多くの被害が発生し、橋梁の機能そのものを失わせる可能性も大きいため、近年の意識の高まりから、主桁の一般部・格点部と同等のウエイト付けがなされたものと考えられる。この傾向は、一般の橋梁設計に携わる技術者の判断により多くの影響を及ぼしたため、管理者との差異が生じたのものである。また、伸縮装置は、管理者の方が大きなウエイト付けとなっている。この伸縮装置においても、高欄と同様に通行車両に対する使用性あるいは安全性の観点に起因しているものと判断される。

その他の要素については、道路管理者、実務技術者ともその傾向はほぼ一致していると考えられ、本調査結果を見る限りにおいては、上部構造はある程度統一された判断基準によって維持補修が行われているものと推定される。

また、合成桁と非合成桁に着目すれば、レベル3ではほぼ同一となっているものの、レベル2では床版のウエイトは合成桁の方が大きく、主桁のウエイトは非合成が大きくっており、妥当な結果となっている。このように、合成・非合成では床版と主桁にある程度の差異は生じていることは確認されたが、どちらのウエイトも非常に大きく、仮にこれらの部材に損傷が生じた場合、最終的な判定順位もかなり上位に位置する結果となることは明らかである。したがって、合成桁・非合成桁を厳密に分けたとしても、現実にはあまり意味を持たないと思われ、解析システムの信頼性にも影響を及ぼさないものと考えられる。

次に、上部構造のレベル4における点検項目についてのウエイトの比較を行った。図-7に、各点検項目のウエイト比較の一例を示す。図-7に着目すると、まず床版の要素の中では、鋼板接着部の損傷と剥離・鉄筋露出のウエイトが大きくなっていることがわかる。鋼板接着部の損傷に関し

ては、一度補修を行っているためそれが損傷再度損傷すると床版全体に大きな影響を与えることが予想され、ウエイトが大きくなったものと思われる。剥離・鉄筋露出については、点検項目にも挙げられているひび割れ、遊離石灰、豆板・空洞などの損傷が進行した状態になって現れるものであるため、当然ながらこのウエイトが大きくなったと考えられる。これは道路管理者、実務技術者双方について言えるだけでなく、例えば舗装等の床版以外の項目においてもほぼ同様の傾向が現れている。横桁においても、同様に腐食、亀裂等が進行した後には生じる破断のウエイトが大きくなっており、ほぼ妥当な結果となっているものと思われる。

また、道路管理者と実務技術者の相違点について述べると、床版および舗装の剥離・鉄筋露出、横桁の破断、亀裂に有意な差が生じていることがわかる。床版の剥離・鉄筋露出および横桁の破断、亀裂については、道路管理者の方が実務技術者よりもある程度明確な判断基準を有しているためであると推定される。その理由として、例えば上述のようにひび割れ等が進行した上で生じる剥離・鉄筋露出のウエイトの差が、道路管理者の方が明確であること、あるいは横桁におけるウエイトが、亀裂ではそれほど大きくなく、破断では技術者を上回っていること等を考慮すると、管理者の補修を行うべき損傷の程度がかなりはっきりとしており、より致命的と思われる項目のウエイトの比率が高いと言った傾向が生じたものであると思われる。

さらに舗装に着目すると、管理者と技術者の差異は段差・コルゲーションの項目において大きくなっている。これは管理者の立場に立った場合、車両の走行性・安全性を重視すると考えられ、その違いがウエイトに反映されていると考えられる。図-7には示していないが、伸縮装置についても異常遊間・段差における両者の差が大きく、道路管理者は使用性が維持補修を判断する1つの指標となっていると考えられる。

4. 2 下部構造の重要度

図-8 は下部構造のレベル4における実務技術者と道路管理者のウエイトを比較したものである。

まず、下部構造に関して行った一対比較において C.I.

■ 実務技術者 □ 道路管理者

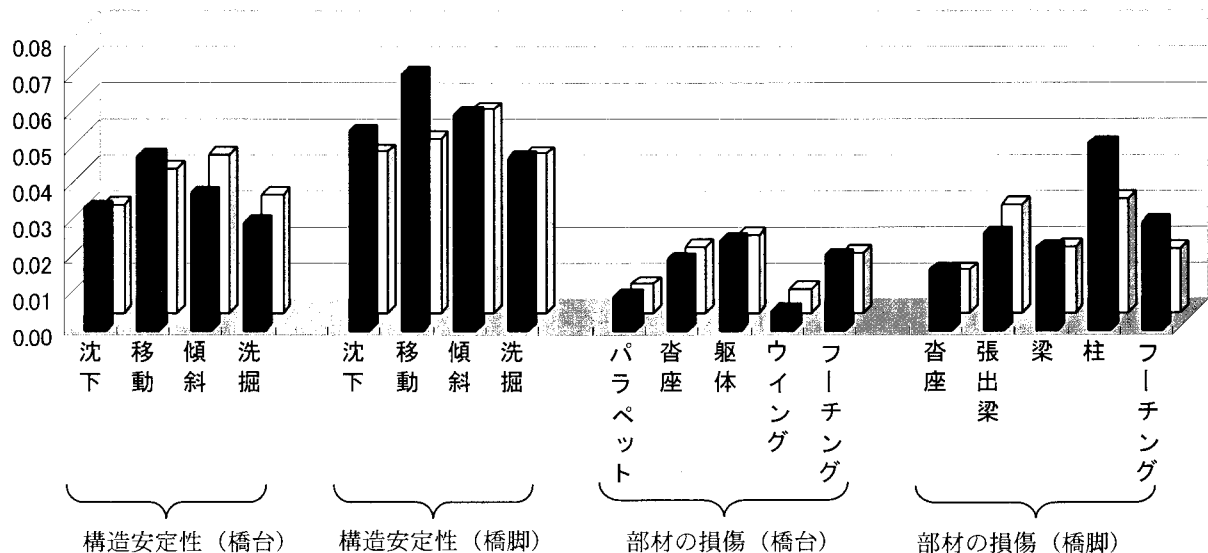


図-8 下部構造レベル4における総合ウエイト比較

値は全てのケースで 0.000～0.004 となり、上部構造の場合と同様に整合性の基準となる 0.1 を下回り、比較的信頼度の高い回答が得られたものと考えられる。

レベル 3 の構造安定性と部材の損傷を比較すると、構造安定性のウエイトが部材のほぼ 2 倍となっており、前者を重要視している傾向が窺える。下部構造において構造安定性が損なわれることは、橋梁システム全体に即座に影響を及ぼすことが多いと考えられ、部材の損傷のように橋梁の機能に問題が生じる程度に進行するまでの時間的余裕が少なく、これらの項目に異常が発見された場合は早急な対策が必要となるケースが多いためであろう。

レベル 4 の各項目については、構造安定性に着目すると道路管理者の方が各項目の重要性を平均的に考えていることがわかる。すなわち、実務技術者においては移動のウエイトが大きく、項目間の差異がある程度ははっきりしているのに対し、道路管理者は傾斜が若干大きい他はあまり差は見られない。これは、前にも述べたように安定性が損なわれると早急に対策を講じるような思想を反映しているものと思われ、道路管理者においては各項目とも同程度の重要性を有しているとの評価がなされたと考えられる。また、橋脚の柱とフーチングで管理者と技術者の差異が大きいが、技術者においては実務設計の観点から評価を行っているとは判断される。通常下部構造の設計では、柱・フーチング基部の応力状態が最も厳しく、旧来の設計での鉄筋段落とし部の問題等も含めて評価を行った結果、管理者との差異が明確になった可能性が高い。

下部構造の部材の損傷に関するレベル 5 の点検項目は、コンクリート構造物を対象としているため、すべて同一の項目を用いている。図-9 に下部構造における点検項目のウエイト比較を示す。図-9 から、上部構造でも見られたように管理者における剥離・鉄筋露出がやや大きめの値となっており、下部構造においても一貫した基準で評価が行われていることがわかる。

以上より、道路管理者と実務技術者の橋梁の維持管理、補修・補強に関する考え方は、上部構造、下部構造の双方においてある程度の差異を有することが判明した。これらの違いは、道路管理者と実務技術者の立場を明確に反映していると考えられるが、AHP の階層構造から算出したウエイトそのものの差は意外と小さく、意思決定プロセスにおいて重大な問題は発生しないと推定される。

なお、これらの検討から明らかとなった問題点としては、階層構造を作成する際に、例えば使用性、安全性といった項目も加味し、構造物の健全性とは切り離れた観点で評価を行う必要が認められる。また、何らかの形で構造的な特性そのものを表現できる場合(実応力の差異等)は、意思決定の過程にそれをパラメータに用いるような工夫も考慮すれば、より有効な劣化順位判定が行えるものと推定される。

5. 実橋における劣化順位の評価

本研究では実橋点検データを用いて AHP による劣化順位の決定に関して解析を行い、道路管理者における結果と実務技術者との比較検討を試みた。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、表-3 に示すような北海道内の主要道 23 橋のデータを用いている。なお、今回の解析で用いた実橋データは、点検によって発見された損傷は明記されているものの、その程度に関しては全く記述されていなかった。そこで本研究では、入力に際して階層図の要素と同様の損傷が存在した場合は 1 を、存在しない場合は 0 をそれぞれ入力し、各橋梁の総合ウエイトを算出する。本来、このような入力手法は AHP の特

□ 実務技術者 □ 道路管理者

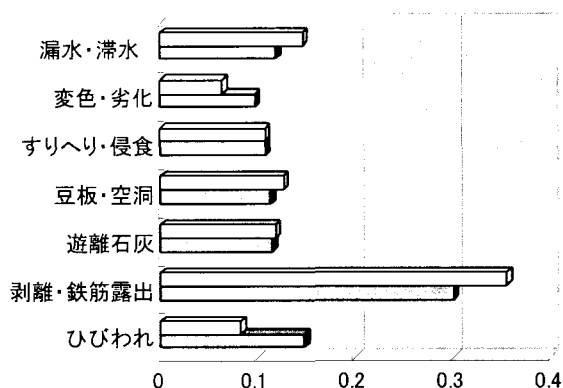


図-9 点検項目ウエイト比較 (下部構造)

徴を十分に生かすことは出来ないが、今回対象とした橋梁全てに上記のような入力を用いているため、結果の比較は可能であり、意思決定プロセスの検討には問題は生じないと判断し、解析を進めることとした。

以上のような手法で算出した橋梁の総合ウエイトとその順位を表-4 に示す。まず、全体的な結果は、点検データから判断するとほぼ妥当な順位付けがなされているものと思われる。この得られた順位から 23 橋をそれぞれ約 1/3 ずつ上位 (1～8 位)、中位 (9～16 位)、下位 (17 位以下) の 3 グループに分けて考えると、道路管理者および実務技術者の比較においてグループ内では多少の順位の変動は見られるものの、グループ間で順位が入れ替わっている橋梁は認められない。

ここで、1 位から 8 位の上位グループに着目すると、i 橋は上部構造の床版・下部構造の洗屈のようにウエイトの大きい損傷が多いことが、順位が高くなった主な原因であろう。i 橋に関しては、その損傷は上部構造が腐食・錆、下部構造は部材の剥離となっており、個々のウエイトは小さいが多数の部材が影響を受けていることから、それらが加算されて総合ウエイトが大きくなっている。r 橋は、道路管理者と実務技術者で順位に差が生じている。この理由は、r 橋が非合成桁であるため、実務技術者においては床版のウエイトが若干小さく、床版にある程度大きい損傷を有する r 橋の場合、上記のような差異が現れたと考えられる。

次に 9 位から 16 位までの中位グループにおいては、f 橋が最も大きく異なる順位となっている。f 橋は合成桁であり、床版の損傷が主体であることから、実務技術者の方が評価が高くなることが予想されたが、レベル 4 における損傷そのものの影響が大きく、合成・非合成を区別しなかった道路管理者が、より厳しい判定を与えている。このことは、今回用いたような点検項目に基づいて順位付けを行う限りにおいては、合成桁と非合成桁を区別しても最終的な結果には大きな影響を及ぼさないことを示しているものと思われる。

また 17 位以下においては、道路管理者と実務技術者の間で 18～21 位がすべて異なっているが、このグループでは総合ウエイトが小さく、わずかな差で順位が決まっているため、全体的には大きな問題とはなり得ないと考えられる。d,e,m,o の各橋梁における損傷は、地覆や下部構造の躯体ひび割れ等の、レベル 4 におけるウエイトの小さいものが主体となっており、道路管理者の方が比較的進行したと考えられる損傷に対して大きいウエイトを与える傾向

表-3 実橋点検データ (A: 橋台、P: 橋脚)

橋梁	構造	種別	損傷 (上部構造)	損傷 (下部構造)
a 橋	合成桁	鋼単純 3 本主桁	地覆(破損)・鋼主桁(塗装劣化)	支承モルタル(ひび割れ)A
b 橋	合成桁	鋼単純 3 本主桁	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	合成桁	鋼単純 3 本主桁	鋼主桁(塗装劣化)	抽擁壁(洗掘)A・支承モルタル(破損)P
d 橋	合成桁	鋼単純 3 本主桁	舗装(ひび割れ)・鋼主桁(劣化)・高欄(腐食)	躯体(ひび割れ)A
e 橋	合成桁	鋼単純 3 本主桁	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	合成桁	鋼単純 3 本主桁	床版(剥離)	躯体(ひび割れ)A
g 橋	合成桁	鋼単純 3 本主桁	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	合成桁	鋼単純 4 本主桁	床版(ひび割れ・遊離石灰)	なし
i 橋	合成桁	鋼単純 3 本主桁	排水施設(パイプ鏽)・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	合成桁	鋼単純 3 本主桁	地覆(ひび割れ)・床版(ひび割れ)	支承モルタル(破損)A
k 橋	合成桁	鋼単純 3 本主桁	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	合成桁	鋼単純 3 本主桁	地覆(剥離)・鋼主桁(腐食)・橋梁全体(鏽)・支承(亀裂)	パラペット(剥離)・杵座(剥離)・躯体(剥離)A・躯体(破損)P
m 橋	合成桁	鋼単純 3 本主桁	地覆(剥離・鉄筋露出)	躯体(剥離)A
n 橋	合成桁	鋼単純 3 本主桁	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)・高欄(破損)	フーチング(鉄筋露出・ひび割れ)P
o 橋	合成桁	鋼単純 3 本主桁	鋼主桁(塗装劣化)	支承モルタル(破損)A
p 橋	合成桁	鋼単純 5 本主桁	舗装(ひび割れ)・床版(ひび割れ)	支承モルタル(破損)A
q 橋	合成桁	鋼単純 3 本主桁	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	非合成桁	鋼単純 3 本主桁	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	非合成桁	鋼単純 5 本主桁	地覆(ひび割れ)	杵座(ひび割れ)A
t 橋	非合成桁	鋼単純 4 本主桁	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	非合成桁	鋼単純 4 本主桁	鋼主桁(塗装劣化)・床版(遊離石灰)	躯体(ひび割れ)A
v 橋	非合成桁	鋼単純 4 本主桁	高欄(塗装劣化)・舗装(ひび割れ)	なし
w 橋	非合成桁	鋼単純 3 本主桁	高欄(腐食・欠損)・地覆(鉄筋露出)	フーチング(洗掘)

を有することは、前にも述べた通りである。この道路管理者と実務技術者の考え方の差異が、損傷が小さい場合には比較的大きく順位に反映されたものと考えられるが、具体的な数値では 0.1~0.2 程度であるため実用上はほとんど問題にならないと推定される。

以上のように、道路管理者と実務技術者の間には若干の相違が見られるものの、特に最終的な総合ウエイトが上位の橋梁はほぼ同一の順位となっており、管理者・技術者双方ともある程度統一的な維持補修に関する見解を有しているものと思われる。アンケート調査結果、あるいは AHP における重要度そのものの比較では、個々の項目に対して両者が異なる場合も見受けられたが、実橋点検データに対して AHP を適用し、最終的に得られた総合ウエイトに関して考察を行えば、管理者・技術者ともに近似した評価基準を有していると判断でき、本研究の意思決定過程はある程度実用的な橋梁補修計画の支援を行える十分な可能性を示しているものと考えられる。また、合成・非合成桁の分類を行うか否かについては、今回の解析結果の範囲では、この構造上の違いによる順位の変化は認められなかった。その理由としては、例えば床版では両者のウエイトに差があることは明らかであるが、総合的な順位に影響を与える程度のものではないと考えられ、補修計画を策定する段階では、合成・非合成桁を区別する必要性はそれほど重要ではないと推定される。さらに、本研究の解析結果は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、昨今の情報の透明性を重視する世相にも適合するものと思われる。

表-4 解析結果の比較 (橋梁順位) ($\times 10^{-2}$)

順位	橋梁	道路管理者			橋梁	実務技術者		
		上部	下部	総合		上部	下部	総合
1	i	3.2	5.0	8.2	i	3.0	5.7	8.7
2	l	4.7	3.1	7.8	l	3.9	3.9	7.8
3	r	6.1	0.8	6.9	k	1.2	5.6	6.8
4	k	1.1	4.7	5.9	w	0.6	4.8	5.4
5	w	0.9	4.4	5.3	r	4.5	0.8	5.3
6	c	1.0	3.7	4.7	c	0.6	3.8	4.4
7	g	3.1	0.8	3.9	g	3.3	1.0	4.3
8	n	3.1	0.8	3.9	n	3.0	1.3	4.3
9	b	2.4	1.0	3.3	b	2.5	1.2	3.8
10	f	2.9	0.2	3.0	q	0.4	3.2	3.6
11	t	2.7	0.2	2.9	t	2.5	0.3	2.8
12	q	0.4	2.2	2.6	f	2.4	0.4	2.8
13	j	1.6	0.8	2.4	j	1.8	0.9	2.7
14	p	1.6	0.8	2.4	p	1.8	0.9	2.7
15	h	2.4	0.0	2.4	h	2.5	0.0	2.5
16	u	2.1	0.2	2.3	u	2.1	0.4	2.4
17	a	2.1	0.2	2.2	a	1.8	0.3	2.1
18	o	1.0	0.8	1.8	e	0.8	0.9	1.7
19	d	1.4	0.2	1.6	m	0.7	0.8	1.5
20	m	0.8	0.8	1.5	o	0.6	0.9	1.5
21	e	0.8	0.6	1.4	d	1.1	0.4	1.4
22	s	0.4	0.2	0.5	s	0.3	0.3	0.6
23	v	0.4	0.0	0.4	v	0.4	0.0	0.4

6. あとがき

以上のように、本研究は上部構造と下部構造の双方を含めた橋梁システム全体を対象として、維持管理あるいは補修・補強に関する意思決定プロセスを明確にし、実橋点検データに基づいた汎用的な劣化順位決定手法について検

討を加えたものである。

具体的には、まず維持管理の基本的な考え方を把握するため、道路管理者および実務技術者に対して橋梁補修に関する AHP の階層図に基づいた意識調査を実施し、その傾向あるいは立場の違いによる相違点について考察を加えた。次に、この意識調査結果を数値化することにより、AHP における各項目のウエイトを算出して劣化順位判定プロセスの構築を実施し、これに実橋点検データを入力してその妥当性あるいは有効性等について検討を行った。ここで、本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- 1) アンケートによる道路管理者と実務技術者の橋梁の維持管理に関する意識調査においては、いくつかの項目において両者にある程度の相違は生じており、これは使用性や安全性に影響を及ぼす項目が多く見受けられた。道路管理者の意見として、高欄・照明等は、使用性あるいは安全性の観点からはすぐに補修を行う性質のものであり、橋梁の長寿命化とは本質的には異なるものとの指摘も受けたことから、これらの取り扱いには注意が必要であると思われる。
- 2) AHP のウエイトから道路管理者と実務技術者の差異について考察を加えると、道路管理者の方がやや明確な判断基準を有している推定される結果が得られ、上述の通り多少の相違点も有することが判明したが、ウエイトそのものの差は非常に小さく、全体的には同一の傾向にあるものと判断される。
- 3) 実橋点検データを用いた解析結果からは、総合ウエイトに基づいた順位は管理者・技術者においてほぼ同一となり、1)ならびに2)のような差異は、最終的な意思決定には大きな影響を及ぼさないことが判明した。
- 4) 補修計画策定の段階では、合成桁・非合成桁を厳密に区別しても総合的な順位に重大な変化はほとんど生じないと考えられる結果が得られた。ただし、実際の補修・補強工事施工の段階では両者の相違を考慮することは当然であり、注意が必要である。
- 5) 本研究のような意志決定支援のための AHP の適用性は、階層図の構築ならびに各項目間の一対比較等が、アンケート調査による情報収集から、ある程度容易に可能であり、整合性の検討も具体的な数値で行えることから、非常に高い有効性等を有しているものと判断される。

最後に問題点に関して言及すると、まず構造物の長寿命化あるいは耐久性等に関わる部材・項目と、使用性や安全性に深く関わる部分を分割して考える必要が認められる。また、例えば応力頻度測定等のモニタリングを行うことによって得られた物理量もパラメータとして取り扱い、同時に LCC に代表されるようなコスト面での検討も取り入れることが可能となれば、より実用的な劣化順位の検討が行えるものと考えられる。

謝辞：

本研究を実施するにあたり、アンケート調査にご協力頂きました、独立行政法人 開発土木研究所 構造研究室 池田憲二氏ならびに北海道開発局の関係部局の方々、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)の方々に対して、ここに記して深い謝意を表する次第です。

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.
- 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) 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.
- 4) 大島俊之，三上修一，本間美樹治，水元尚也，野村浩邦：重み係数を用いた橋梁健全度のランク付けの研究，土木学会北海道支部論文報告集，第 52 号(A)，pp.498-503，1996.
- 5) 山岡健一，小野正樹，宮本文穂，中村秀明：Bridge Management System(BMS)の実橋への適用と実用性の向上，土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集，第 1 部(A)，pp.534-535，1998.
- 6) 白倉篤，前田剛志，水口弘範，宮本文穂，中村秀明：階層構造モデル作成機能の構築と構造物維持管理支援システムへの統合および評価，土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集，第 1 部(A)，pp.450-451，1999.
- 7) 森弘，大島俊之，三上修一，天野政一，井上実：コンピュータ・グラフィ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.
- 8) 近田康夫，橋謙二，城戸隆良，小堀為雄：GA による既存橋梁の補修計画支援の試み，土木学会論文集，No.513/I-31，pp.151-159，1995.
- 9) 古田均，亀田学広，伊藤弘之，高橋祐治：遺伝的アルゴリズムを用いたコンクリート橋梁群の最適維持管理計画の策定，応用力学論文集，Vol. 5，pp.919-926，2002.
- 10) 古川浩平，古田均，仁多和英：一対比較法の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.
- 11) 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.
- 12) 刀根薫：ゲーム感覚意志決定法-AHP-入門，日科技連出版社，1990.
- 13) 刀根薫，眞鍋龍太郎：AHP 事例集，日科技連出版社，1990.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 小幡卓司，林川俊郎，佐藤浩一，濱木道大，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，pp.697-704，2000.
- 18) 小幡卓司，林川俊郎，佐藤浩一，木村竜太，宮森保紀：AHP を用いた橋梁補修計画支援システムの構築について，鋼構造年次論文報告集，第 9 巻，pp.279-286，2001.

(2003 年 9 月 12 日受付)