

橋梁各部材の資産的評価と橋梁健全度指数の解析

大島俊之¹・三上修一²・丹波郁恵³・佐々木聡⁴・池田憲二⁵

¹フェロー会員 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学生会員 工修 北見工業大学大学院 博士後期課程システム工学専攻 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

⁴正会員 (株)ドーコン 橋梁部 (〒004-8585 札幌市厚別区中央1条5丁目4-1)

⁵正会員 独立行政法人北海道開発土木研究所 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

本論文は橋梁全体の資産価値を評価するため、まず橋梁各部材の資産的評価を計算する手法を検討した。これまでの多くの橋梁の施工実績経費から橋梁各部材の単価的な建設必要経費を算出するとともに、橋梁全体の初期建設費としての資産価値を評価できる手法を検討した。また橋梁点検要領による点検結果のランクを損傷係数として用いて現存する橋梁の現在の残存資産価値を算出した。これらの残存資産価値と初期建設費との比を橋梁健全度指数 (BHI) と呼び、現存する橋梁の劣化を考慮した健全度をあらわす指標とした。またこれらの健全度指数についての解析結果を著者らが前論文¹⁾において解析した橋梁総合健全度に関する解析結果と比較検討して、橋梁健全度指数 (BHI) の有効性について検討した。

Key Words : Bridge Management System(BMS), asset evaluation, Bridge Health Index(BHI)

1. まえがき

橋梁の点検評価および維持管理技術を発展させて、有効な Bridge Management System (BMS) を構築するための調査研究活動が近年盛んとなっている。この新しい BMS の検討内容としては、従来の目視による点検に変わって、モニタリング技術などを用いて定量的に橋梁の健全性を評価しようとする内容と²⁾⁻⁵⁾、橋梁の維持管理費をライフサイクルコスト (LCC) の最適化の問題としてとらえて、様々な影響因子を分析する内容に大別できる⁶⁾⁻¹¹⁾。

本論文の内容はこれらの新しい BMS 開発検討の中で、橋梁の総合的健全度診断評価手法を開発して、橋梁の全体の維持管理水準を定量的に比較検討できる手法を開発しようとするものである^{1), 12)-14)}。

著者らはこれまでの橋梁の総合的健全度評価を実施するための手法として、重み付き平均法を用いる方法を提案してきた^{1), 15), 16)}。特に総合的健全度を重み付き平均法によって評価する際の重み係数を設定する手段として、熟練したエキスパートの判断を外的基準に用いる数量化理論Ⅱ類による解析法を提案した。更に多くの実橋に対する解析結果やニューヨーク市における重み付き平均法

の内容を基礎データとして、各部材に対する重み係数を確定し、総合的健全度 S_t を評価できる手法を提案した。

さて、これらの総合橋梁健全度評価についての検討内容は、昭和 63 年に提案された建設省土木研究所の橋梁点検要領 (案)¹⁷⁾ による橋梁各部材に対する目視による物理的 point 検査データを基礎として、これらの結果を用いて総合的に健全度として評価する手法を提案したものである。

一方、米国 Caltrans および AASHTO において用いられている橋梁の維持管理のための総合診断評価システムである PONTIS^{18), 19), 20), 21)} においては、橋梁健全度指数 (Bridge Health Index, BHI) として橋梁各部材の社会資本としての資産価値に着目して、橋梁の健全度を評価する手法を導入している。橋梁構造は本来、社会資本としての道路ネットワークの重要な構成要素として、社会基盤施設としての役目を果たしている。また、その維持管理経費の社会経済的位置付けの必要性が高まる中で²²⁾、橋梁の資産価値としての側面はますます重要なものとなっている。

このような背景から本論文では、橋梁の構造各部の資産的価値 (建設に要する費用) に着目して、各橋梁の現存する資産価値を算出するとともに、点検結果から得られた損傷ランクを資産価値の減少 (損傷係数) ととらえ

る評価方法を導入する。また、各橋梁の総合的健康度評価を土木研究所の橋梁点検要領に基づく点検データを用いて橋梁健全度指数 (BHI) として算出する手法についても検討する。

このような橋梁構造の健全性を、社会資本としての価値 (経済的評価) に基づいて橋梁健全度指数 (BHI) として評価する手法は橋梁の社会経済的側面に立脚した評価方法であり、従来の橋梁点検結果に基づく物理的健康度の評価法や熟練技術者による健全度の総合的判断とは異なるものである。

しかし、今後増大する橋梁の維持管理経費およびユーザークラウド²⁹を含めた補修補強経費が経済社会に及ぼす影響が大きいため、橋梁の資産価値としての評価法を導入して評価しておくことも重要な検討項目と考えられる。

したがって本論文の目的は我国の現在の橋梁点検データを基本として、これらの点検データを有効に活用するとともに、構造諸元とこれまでの施工実績から簡略に資産価値を算出できる方法を検討して、全橋梁に対する資産評価および橋梁健全度指数 (BHI) を求めることができる手法を提案するものである。そしてこのような手法を確立することができれば、将来的にその各項目を精査して、より現実に近い橋梁の資産評価と健全度指数 (BHI) の結果が得られるものと考えられる。

2. 橋梁健全度指数 (BHI) の定義

個々の橋梁は一つの社会 (橋梁) 資産と考えることができ、これらの資産を合理的な計画の下で総合して維持管理し、長期的な視点からの資産向上を図るための補修計画が必要である。ここでは、前述したように Caltrans および AASHTO の「PONTIS」において用いられている橋梁の現状を橋梁資産価値として表すことができる橋梁健全度指数 (BHI) の有効性に着目して検討する。

橋梁健全度指数は、橋梁各部材の資産評価価値 (経済的価値) に着目して、橋梁全体の建設当初の総資産価値に対する、供用後の現在の残存資産価値の比として表される。すなわち橋梁各部材の残存資産価値を評価する際に橋梁点検データによる各部材に対する物理的劣化を、損傷による資産価値の低下と見なして計算するものであり、経済的資産価値に物理的損傷結果のデータを組み合わせたものである。橋梁健全度指数 (BHI) は式 (1) に示すように定義される。なお、ここでは橋梁健全度指数は [25-100] の値をとる。

$$\text{橋梁健全度指数 (BHI)} = \frac{\text{現在資産 (建設費)}}{\text{初期資産 (建設費)}} \times 100 \quad (1)$$

表-1 各部材の資産価値の低下率

部材の損傷度	損傷係数
II	0.75
III	0.50
IV	0.25
OK	0

初期資産 (建設費) : 全ての部材が健全な状態 (建設当初) の橋梁全体の建設費

現在資産 (建設費) : 現在 (部材に損傷を有する状態) の橋梁全体の建設費

初期資産は部材毎の建設費について、それぞれ単価および総数量を用いて算出する。主桁を例とすると、

$$\text{主桁の初期資産} = [\text{主桁単価}] \times [\text{主桁総数量}]$$

となり、同様に求めてきた橋梁各部材の初期資産の総和を橋梁全体の初期資産 (建設費) とする。

一方、現在資産は各部材の初期資産および橋梁点検データにおける各部材の損傷度を用いて求める。ここで、橋梁点検データは建設省の点検要領 (案) を基に 20 項目の部材箇所に対して点検が実施された結果をデータとして用いている。また各部材の損傷度判定基準については OK~I の 5 段階とされているが、判定 I に関しては早急な調査および補修等が必要とされることから、実際の点検データ上では OK~II の 4 段階となっている。この橋梁点検データから表-1 に示すような割合で各部材の資産価値が低下すると考えると、例えば点検データから主桁の損傷度判定が III である橋梁における主桁の現在資産は、

$$\text{主桁の現在資産} = [\text{主桁建設費}] \times 0.50$$

ここで、

$$[\text{主桁建設費}] = [\text{主桁単価}] \times [\text{主桁総数量}]$$

となる。同様に求めてきた各部材の現在資産の総和をその橋梁の現在資産 (建設費) とする。ここで用いた表-1 の部材の損傷度と損傷係数の関係は、PONTIS と同様に損傷係数を部材の損傷ランクに比例させて用いている。実際の資産の低下率が部材の損傷ランクに比例しているか否かは今後詳細に検討する余地があるが、本論文では 5 段階の部材損傷ランクに資産低下が等間隔 (等分割) で比例して変化するものと考えている。

なお、ここで述べる初期資産については、橋梁建設後の経済的物価変動の影響を受けることから、以下に述べるように、現在と同じ構造諸元の橋梁を現時点で新設するために必要な経費として算出する。

表-2 部材項目

上部工	(1) 主桁
	(2) 床版
	(3) 支承
	(4) 高欄
	(5) 地覆
	(6) 舗装
	(7) 伸縮装置
下部工	(8) 躯体 (橋台・橋脚)
	(9) 基礎

表-3 主桁の形式

材質	単純桁	連続桁
鋼	鉄桁	鉄桁
	箱桁	箱桁
	鋼床版桁	鋼床版桁
	トラス	トラス
	アーチ	
コンクリート	プレテンボースラブ	ボーステンボースラブ
	ボーステン桁	ボーステン箱桁

3. 橋梁各部材の資産評価

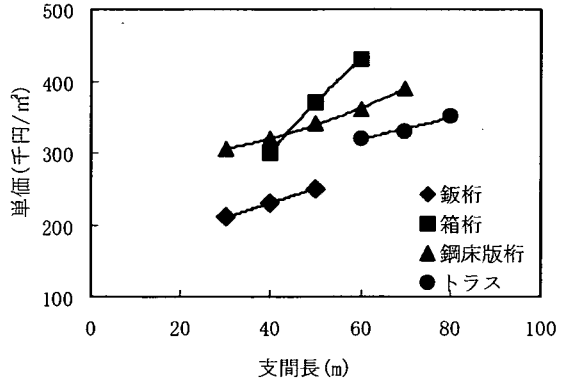
橋梁全体の資産評価として、橋梁健全度指数 (BHI) を算出するためには、橋梁の各部材に対する資産評価が必要となることは前述のとおりである。しかし、我国においてこの評価法を導入する場合、我国の橋梁点検データに適合した橋梁各部材の資産評価が必要である。ここでは橋梁の部材毎の資産評価方法について述べる。

(1) 評価の考え方

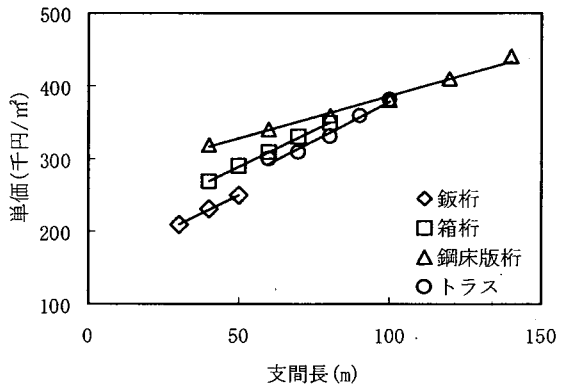
橋梁各部材の資産評価は各部材の建設費および損傷状況により行うことができる。実務レベルの橋梁建設費は部材毎の詳細な計算が必要になると考えられるが、ここでは橋梁点検調査に記載される橋梁各部材の構造諸元データ¹⁷⁾を参照して各部材の建設費を算出できる方法についての検討が必要である。また、前論文^{1), 15)}では各部材の橋梁全体の総合健全度に対する重要度を検討し、14項目の部材を選定して橋梁点検データを再編した。従って、この再編したデータに基づいて橋梁の資産評価を行うことを考慮し、表-2に示すような主要部材9項目に対して部材単価を決定することとする。また各部材の単価設定にあたり、橋梁の架設年による物価変動を考慮して現時点に統一する。

(2) 主桁の評価

主桁は材質によって大きく鋼桁とコンクリート桁に分け単価設定を行う。またそれぞれで単純桁および連続桁



(a) 鋼単純桁



(b) 鋼連続桁

図-1 支間長と単価の関係 (鋼桁)

に区分し、表-3に示すような形式を考える。これらの各形式において実際の桁工事費 (実績) から、形式毎に適用される支間長²⁴⁾で橋体面積あたりの単価 (千円/㎡) を算出する。ここで、実際の桁工事費の算出においては標準的な橋体幅員および主桁高・本数等の条件下で計算している。この結果から支間長と工費単価との関係を直線近似により表現することで、各桁形式に対する適用支間長内の単価変動を定式化できる。また工事費を算出するにあたり、以下のように仮定した。

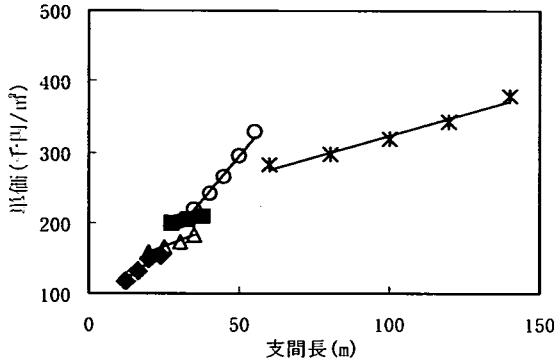
[鋼桁]

- ・工事費は舗装以外の全てを含む。
- ・架設工はトラッククレーン+ベント工法の工事費とする。

[コンクリート桁]

- ・橋面工単価を 20 千円/㎡とする。
- ・架設工は桁形式によりトラッククレーン、架設桁、固定支保工および張出架設とする。

鋼桁およびコンクリート桁における形式毎の支間長と



◆単純プレテンホースラブ
 △連続プレテンホースラブ
 ✱連続ポストテン箱桁(張出架設)
 ■単純ポストテンT桁
 ○連続ポストテン箱桁(固定支保工)

図-2 支間長と単価 (コンクリート桁)

表-4 RC 桁の形式

RC 桁
単純ホースラブ
単純床版桁
T 桁
アーチ
ラーメン

単価の関係について図-1 および図-2 に示す。ここで図-1 の(a) (b) はそれぞれ単純桁および連続桁である。

また、表-3 に示す形式以外の桁に対しては比率を算定して単価設定できるものとする。現在ではコンクリート桁に関して、ほとんどがPC 桁で建設されることから、RC 桁については比率を用いて単価を決定する。ここで比率により算出する RC 桁の形式を表-4 に示す。比率は道路橋年報 (S49~S52 年度版)²⁹⁾ を基に算定する。まず、PC 桁について現在の工費と S49~S52 年時点の工費から物価比率を算定する。この物価比率 (S49~S52/H12=0.65) を S49~S52 年の RC 桁工費に掛けて現在の工費単価とする。ここで RC 単純床版桁を例として、S49~S52 年度および現在の工事費について支間長と単価の関係と比較し図-3 に示す。また、算定した RC 桁の形式毎の支間長と単価の関係について図-4 に示す。

同様に PC 桁と RC 桁、ホースラブとスラブ、プレテンとポステンまたは単純桁と連続桁等の比率を算定し、工費単価を決定する。これらの比率の数値については表-5 に示す。以上のことにより橋梁点検データ内の上部工形式について、ほぼ満足できる工事費単価を決定することができる。

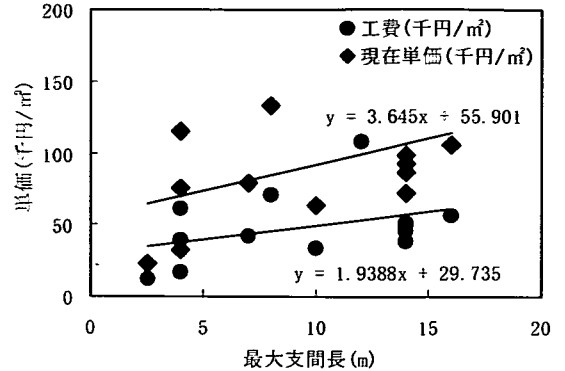


図-3 物価による比較 (RC 単純床版桁)

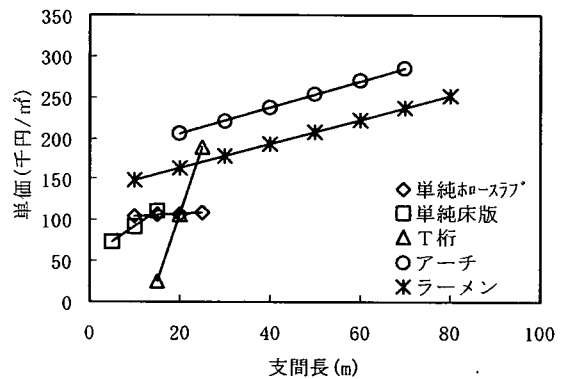


図-4 支間長と単価 (RC 桁)

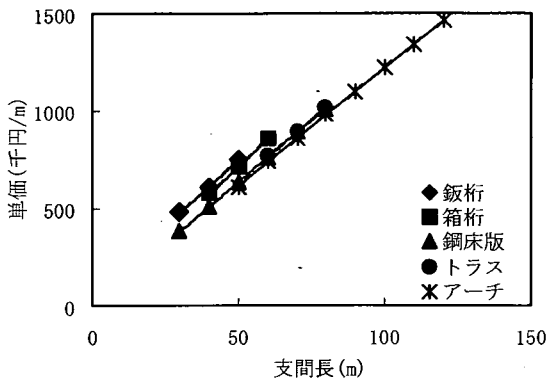
表-5 比率

	比率
物価	S49~S52/H12=0.65
PC 桁と RC 桁	PC 桁/RC 桁=1.5
ホースラブ	ホースラブ=1.16
プレテンとポステン	プレテン/ポステン=0.94
単純桁と連続桁	単純桁/連続桁=0.94

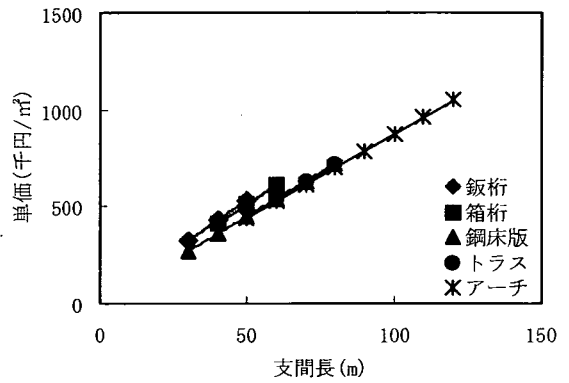
(3) 支承の評価

支承の工費単価は桁により鋼桁とコンクリート桁に分けて設定することとし、主桁の場合と同様に表-3 に示すような桁形式毎で考える。

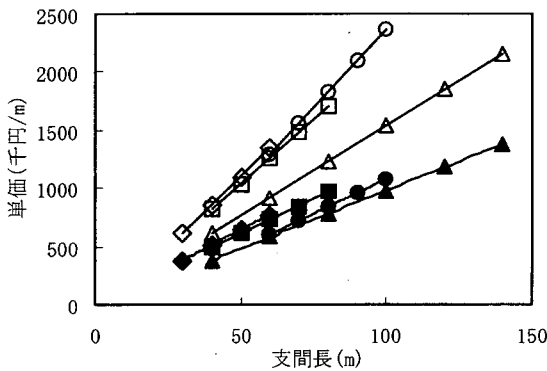
鋼桁における支承単価は、反力値を求めて沓全反力と単価の関係を示したグラフ²⁹⁾により決定する。また橋梁点検データから支承材質により鋼製支承およびゴム支承に区分し、支承単価の単位は橋体幅員方向mあたり (千円/m) とする。なお、ここでも全反力値算出においては標準的な条件の下で計算しており、支承工事費を算出する上で以下のように仮定している。



(a) 単純桁



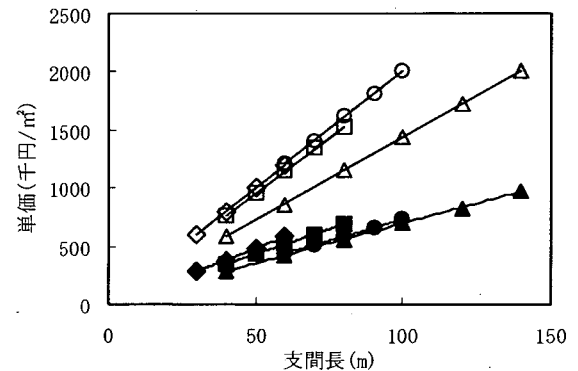
(a) 単純桁



- ◆ 鋼桁端支点
- ▲ 鋼床版桁端支点
- ◇ 鋼桁中間支点
- △ 鋼床版桁中間支点
- 箱桁端支点
- トラス端支点
- 箱桁中間支点
- トラス中間支点

(b) 連続桁

図-5 支間長と単価 (鋼製支承)



- ◆ 鋼桁端支点
- ▲ 鋼床版桁端支点
- ◇ 鋼桁中間支点
- △ 鋼床版桁中間支点
- 箱桁端支点
- トラス端支点
- 箱桁中間支点
- トラス中間支点

(b) 連続桁

図-6 支間長と単価 (ゴム支承)

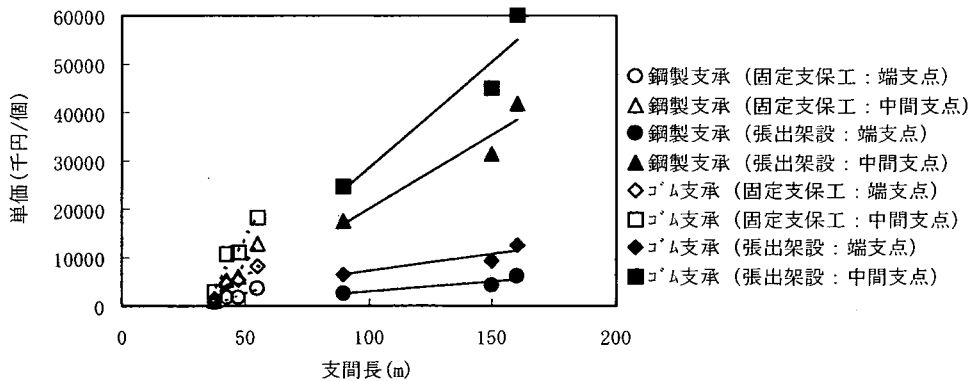


図-7 支間長と支承単価 (ポステン箱桁)

表-6 高欄の製品単価および工費単価

材質	製品単価 (円/m)	工費単価 (千円/m)
鋼製	34,400	39
アルミ製	41,500	46
ステンレス製	41,200	46
コンクリート製	13,100	18

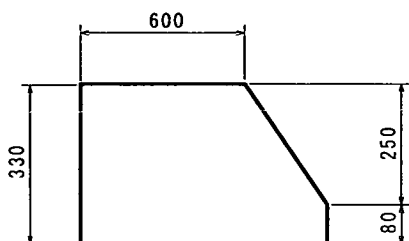


図-8 地覆の標準断面

- ・ゴム支承は積層ゴムタイプ支承を設定する。
- ・据付費を含む。

主桁の場合と同様に桁形式毎に支間長と単価の関係を直線近似により定式化する。鋼桁に関して形式毎の支間長と支承工費単価の関係を図-5 および図-6 に示す。ここで(a)および(b)はそれぞれ単純桁および連続桁である。

一方、コンクリート桁については主として工事実績値から単価設定を行う。実績値より単純桁(プレテンホローおよびポステンT桁)はゴム支承のみとし、連続桁(ポステンホローおよびポステン箱桁)については鋼製支承およびゴム支承を考える。またコンクリート桁における単価の単位は主桁1本あたり(千円/1本)または支承1個あたり(千円/1個)とし、鋼桁と同様、桁形式毎に支間長と単価の関係を定式化する。ここで連続ポステン箱桁を例に支間長と支承単価の関係を図-7 に示す。

その他の桁形式の支承単価については、主桁単価を決定した際の比率を用いることができることとし、橋梁点検データ内の橋梁に対して、ほぼ満足できる支承単価の設定ができる。

(4) 床版の評価

床版については実績値を参考にして単価を決定する。また前述のように橋梁点検データの性質を十分に考慮した上で、単価の単位を選定する。床版単価の単位は橋体面積あたり(千円/m²)とし、また単価の決定に際して以下のように仮定する。

- ・鉄筋コンクリート床版相当とする。
- ・足場工は吊り足場とし、単価は4(千円/m²)とする。

以上、床版単価は40(千円/m²)とする。なお、北海

表-7 伸縮装置の種類別工費単価

材質	伸縮装置の種類	単価(千円/m)
鋼	フィンガージョイント(開発局標準タイプ)	310
ゴム	SPジョイント(SP-505型)	90
	ハイウェイジョイント(YHT-50型)	100
	ウラージョイント(E-80型)	160

道においては鋼床版実績が少ないことから鉄筋コンクリート床版相当に統合して換算した。

(5) 高欄の評価

高欄の単価は床版の単価設定と同様、実績値を基にする。ここで実績値および橋梁点検データより製品としては鋼製、アルミ製、ステンレス製およびコンクリート製の4種類を考える。高欄単価の単位は橋長方向mあたり(千円/m)とし、高欄材質別の製品単価(円/m)および工費単価(千円/m)について表-6に示す。ここで単価の決定において以下のように仮定している。

- ・高欄工据付費の単価4900(円/m)を含む。

(6) 地覆の評価

地覆についても床版の場合と同様、実績値を基に単価を決定する。ここで地覆は橋梁点検データよりコンクリートとし、工事実績値から図-8に示す標準的な断面を仮定する。また単価単位を橋長方向mあたり(千円/m)とし、地覆の工費単価は16(千円/m)とする。

(7) 舗装の評価

舗装も床版と同様、実績値に基づき単価決定を行う。舗装単価の単位は橋体面積あたり(千円/m²)とし、工事実績を考慮して以下のように仮定する。

- ・アスファルト舗装とし、舗装厚は8cmとする。
- ・床版防水工の単価2520円/m²を含む。

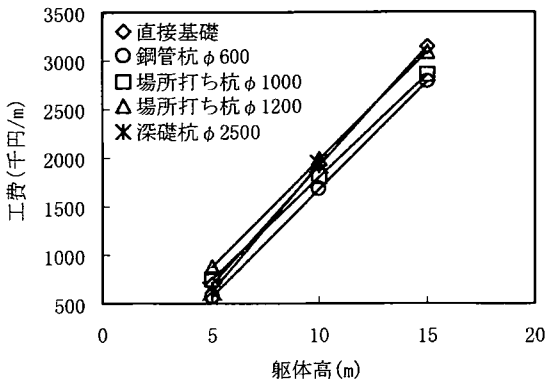
以上から舗装単価は6(千円/m²)とする。

(8) 伸縮装置の評価

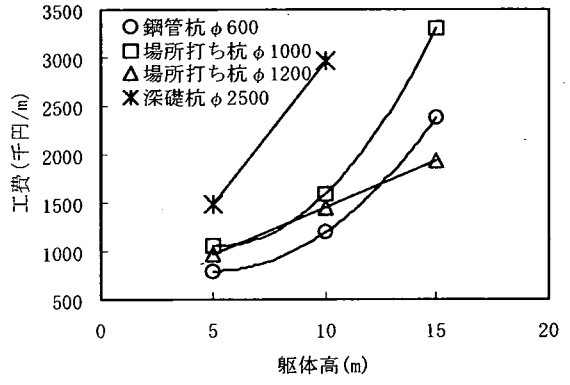
伸縮装置においてもまた、床版と同様に実績値から単価を決定する。ここではまず、橋梁点検データから材質は鋼製およびゴム製を考え、標準的な4種類(鋼製1, ゴム製3)を設定する。また単価単位は橋体幅員方向mあたり(千円/m)とし、表-7に伸縮装置の単価を示す。ここで、ゴム製伸縮装置に関しては実績値を考慮してウラージョイントの単価とする。

(9) 躯体(橋台・橋脚)の評価

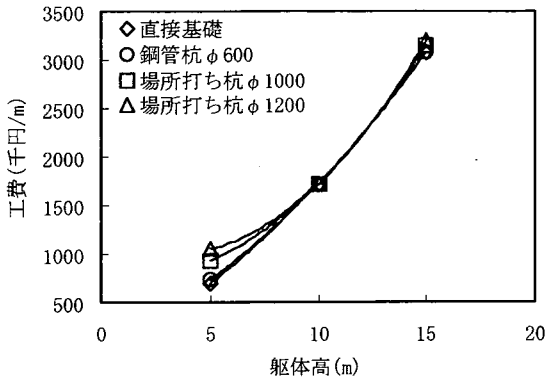
躯体工事費は躯体高や基礎形式により工費単価に変動



(a) 逆T式橋台

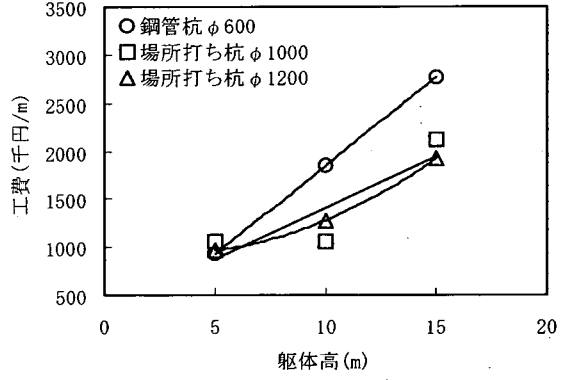


(a) 壁式橋脚



(b) 壁式橋脚

図-9 躯体高と躯体工費の関係



(b) 壁式橋脚

図-10 躯体高と基礎工費の関係

表-8 躯体の形式別の適用躯体高および工費単価

	形式	躯体高(m)	単価(千円/m)
橋台	逆T式	5~15	1,930
	重力式	5	500
	箱式	15~20	6,700
橋脚	逆T式	5~20	2,730
	壁式	5~15	1,880

表-9 基礎の形式別単価(千円/m)

基礎形式		単価(千円/m)
杭	鋼管杭(φ600)	1,650
	場所打ち杭(φ1000~1200)	1,550
	深礎杭(φ2500)	2,220
	ケーソン	4,340

があり、橋梁点検データのみからでは工費算出の精度が低くなる部分と考えられる。しかし、過去の工事実績図²⁰⁾等を十分検討した上で、橋梁点検データの構造諸元を参照して躯体の単価設定が出来るように過去の工事費の実績を評価する。ここで参考として、逆T式橋台および壁式橋脚における躯体高と躯体工費の関係をそれぞれ図-9(a)(b)に示す。これから躯体工費は躯体高により大きく変動することが分かる。また基礎形式による工費の変動は躯体高の場合に比べて小さく無視できると考えられる。しかし、橋梁点検データに躯体高が記述されていないことを考慮して、各躯体形式で標準的(平均的)な躯体高の工費単価をとることとし、工事実績より各形式の適用躯体高内の単価を平均して、それぞれの形式にお

ける工費単価とする。単価単位は橋体幅員方向mあたり(千円/m)とし、形式別の適用躯体高および躯体単価を表-8に示す。また、その他の形式はこれらの単価を準用できることとする。

(10) 基礎の評価

基礎工については大きく杭とケーソンに分けて考える。基礎工の工事費は、杭基礎では杭長または橋台および橋脚の躯体高により、またケーソンでは掘削工法および深さ等により大きく変動する。ここで参考として、杭基礎を例に逆T式橋台および壁式橋脚における躯体高と杭基礎工費の関係についてそれぞれ図-10(a)(b)に示す。これより同形式の基礎であっても、杭基礎工費は橋台およ

表-10 各橋梁の諸データ

	橋長 (m)	幅員 (m)	上部工形式	躯体形式		基礎形式		支承	高欄	伸縮 装置
				橋台	橋脚	橋台	橋脚			
A橋	60	12	2径間連続鋼鈹桁	逆T式	壁式	杭基礎	杭基礎	鋼	鋼	鋼
B橋	16	8	2径間単純プレ/PC床版	逆T式	壁式	杭基礎	杭基礎	ゴム	鋼	ゴム
C橋	65	6	2径間単純鋼鈹桁	半重力式	壁式	ケーソ基礎	ケーソ基礎	鋼	鋼	鋼

表-11 各部材の建設費(千円)および点検結果(損傷度)

	主桁	床版	支承	高欄	地覆	舗装	伸縮 装置	躯体		基礎		総建設費 (千円)
								橋台	橋脚	橋台	橋脚	
A橋	65,880	28,080	16,584	4,716	1,920	4,118	7,368	46,392	22,536	39,600	19,800	256,994
	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
B橋	15,104	0	120	1,258	512	732	3,744	30,928	15,024	26,400	13,200	107,022
	III	III	OK	OK	OK	OK	OK	III	III	OK	OK	
C橋	82,176	14,976	12,128	5,109	2,080	2,231	5,526	6,000	11,268	57,276	28,638	227,408
	II	II	II	IV	IV	OK	OK	OK	OK	OK	OK	

表-12 各橋梁の健全度指数

	上部工建設費(千円)	下部工建設費(千円)	初期資産(千円)	現在資産(千円)	橋梁健全度指数(BHI)
A橋	128,666	128,328	256,994	256,994	100
B橋	21,470	85,552	107,022	76,494	71.5
C橋	124,226	103,182	227,408	143,651	63.2

び橋脚の躯体高により影響されることが分かる。しかし、橋梁点検データでは杭長および躯体高が不明であるため、ここでも実績値等を参考に各基礎形式で標準的(平均的)な杭長および躯体高を決定して単価を設定する。一方、ケーソン基礎については多数の工事実績より工費を平均化して単価を設定した。ここで基礎の単価単位は橋幅員方向mあたりとし、形式毎の工費単価を表-9に示す。また、橋梁点検データにおいて杭基礎の形式が不明な場合は実績値より最も実績が大きいとされる鋼管杭基礎とする。

以上、選定した9項目の主部材に関して工費単価の設定を行った。本論文では橋梁点検データの活用を前提として単価設定を行っているが、実際の工事費算出に必要なデータと橋梁点検データの性質の差は大きく、現場に立つ技術者の視点からでは精度的に不十分であると考えられる。しかし、多数ある橋梁に対して総合的に維持管理する上で、これまでに蓄積されてきた橋梁点検データの活用は有効であると考えられ、現時点のみならず、長期的な視野で部材の劣化状況や資産価値の時間的推移を把握できるものである。

また橋梁点検データとその他のデータを統合させ、個々の橋梁に対するデータを増やすことで、より実務に近い各部材の単価設定および資産評価ができ、評価精度の向上が期待できると考えられる。

4. 橋梁健全度指数の解析

本章では個々の橋梁の橋梁健全度指数(BHI)について解析および検討を行う。なお、橋梁健全度指数の算出においては3章で決定した各部材の単価および橋梁点検データにおける各部材の損傷度を損傷係数として用いる。この健全度指数による検討は橋梁各部材の残存資産価値を評価する際に、橋梁点検データによる各部材に対する物理的劣化度を損傷による資産価値の低下と見なして計算しており、経済的資産評価に物理的損傷結果のデータを組み合わせることが出来る点が利点である。ここでは実際の橋梁に対して橋梁健全度指数を解析し、その結果を検証すると共に全体的な傾向を把握する。

(1) 解析データ

本解析では橋梁点検データを活用することから、北海道の国道橋に対して昭和63年以降、点検が実施された全橋梁を解析の対象とする。北海道の国道に架設されている橋梁の内、平成11年度現在までに点検が実施された橋梁は全2552橋(点検回数による重複を含む:重複データ総数558橋)で、この内3章での単価決定の際、各部材において選定した形式と異なり、またその選定した形式内での準用が不可能である形式の橋梁(314橋)は省くこととし、データ総数は2238橋として解析を行う。

表-13 橋梁健全度指数の分布

橋梁健全度指数 (BHI)	橋梁数 (%)
100	417 (19)
90~100	417 (19)
80~90	483 (21)
70~80	390 (17)
60~70	248 (11)
50~60	174 (8)
40~50	70 (3)
40以下	39 (2)
合計	2238 (100)
平均値	81.4

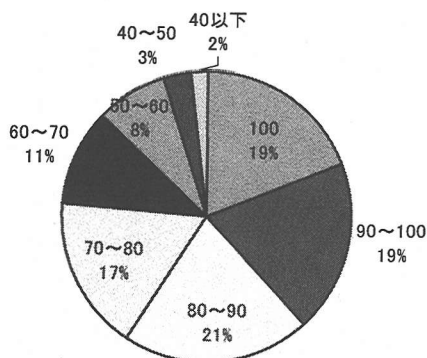


図-11 橋梁健全度指数の分布

(2) 解析結果の具体例

解析結果の具体例として、ここでは2径間を有する橋梁A橋、B橋およびC橋（A橋およびC橋：鋼桁橋、B橋：コンクリート桁橋）の3橋について計算例を示す。これらの各橋梁の橋長、幅員および各部材の形式等の諸データについて表-10に示す。これらの諸データと3章で決定した各部材の単価を用いて部材毎の建設費および橋梁全体の総建設費を算出できる。その結果と橋梁点検データにおける各部材の損傷度を表-11に示す。ここで部材毎に上段は建設費（千円）、下段は4段階の損傷度を示しており、最右欄は橋梁全体としての総建設費である。総建設費は橋梁の規模または形式等により異なる。これらのデータから定義に基づいて各橋梁における橋梁健全度指数を算出した結果を表-12に示す。ここでA橋のように9項目全ての部材に損傷がない場合、橋梁健全度指数は100となり部材に何らかの損傷がある場合、その損傷の規模および程度に応じて橋梁健全度指数は低下する。

(3) 解析結果の全体的傾向

橋梁の維持管理水準を確認するため、北海道における国道橋2238橋の橋梁健全度指数の分布を表-13に示す。

表-14 数量化理論による総合健全度評価の分布

総合健全度評価	橋梁数 (%)
評価OK	904 (40)
評価IV	830 (37)
評価III	431 (19)
評価II	73 (3)
合計	2238 (100)

表-15 重み付き平均法による総合健全度評価値の分布

S _i Rating	橋梁数 (%)
5.0	417 (19)
4.5~5.0	986 (44)
4.0~4.5	589 (26)
3.5~4.0	185 (8)
3.0~3.5	54 (2)
3.0以下	7 (0)
合計	2238 (100)
平均値	4.55

ここで、橋梁健全度指数を8段階に分割し、それぞれにおける橋梁数および全橋梁数に対する割合(%)を表中の橋梁数の欄に、また全橋梁2238橋の橋梁健全度指数の平均値を最下欄に示している。またこれについての円グラフを図-11に示す。これらから北海道全域における橋梁の維持管理状況を把握することが可能である。橋梁健全度指数の平均値は81.4と高く、また全体の約60%の橋梁が80以上の橋梁健全度指数であることより、維持管理水準は比較的高いことが分かる。

5. 橋梁健全度に関する他の計算結果との比較

著者らは橋梁健全度に関する研究として、前論文¹⁾において他の解析法について報告している。ここでは本論文の解析で用いた北海道の国道橋データ（全2552橋）を対象として解析結果の比較検討を行い、解析結果および橋梁健全度指数の妥当性について検証する。

(1) 比較の概要

著者らによるこれまでの橋梁健全度に関する研究の中から、数量化理論および重み付き平均法による解析結果と比較する。これらの解析は実橋データに対するエキスパートの判定結果を基礎として、橋梁全体に対する総合健全度を判定するものである。前者は数量化理論を適用して橋梁の総合健全度を判定するもので、後者は更にその解析結果から各部材（14項目）の重み係数値を求めて総合健全度評価値（S_i Rating 以下S_iと記す）を算出するものである。数量化理論による解析において橋梁の総

表-16 14項目部材

上部構造	主桁1 (腐食)
	主桁2 (亀裂・破断, ひび割れ)
	主桁3 (脱落, 遊離石灰他)
	2次部材
	床版1 (剥離, 鉄筋露出)
	床版2 (床版ひび割れ)
下部構造	床版3 (遊離石灰他)
	躯体
その他	基礎
	支承
	高欄
	地覆
	舗装
	伸縮装置

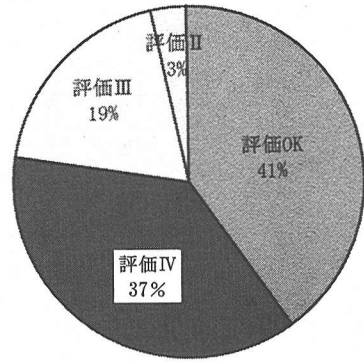


図-13 数量化理論による総合健全度評価の分布

表-17 総合健全度評価

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

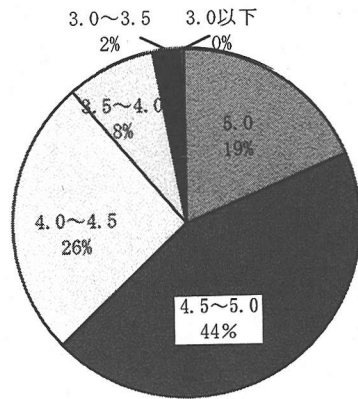


図-14 重み付き平均法による総合健全度評価値の分布

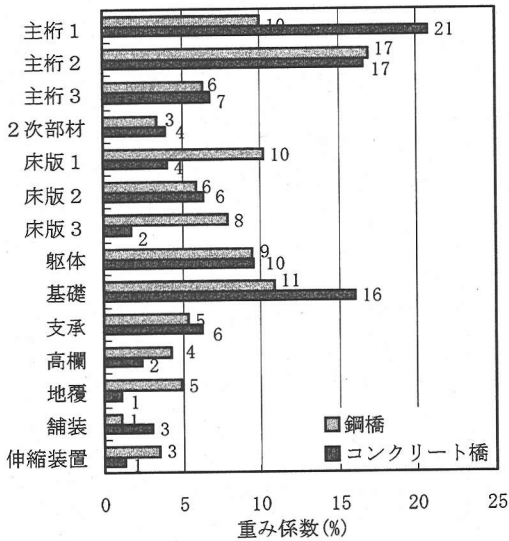


図-12 各部材の重み係数

示す。これらは解析結果の全体的傾向を比較するため、表-13と同様な形式としており、橋梁数の欄に評価値毎の橋梁数および全橋梁数に対する割合(%),重み付き平均法については最下欄に S_i の平均値を示している。なお、参考として解析で選定した部材項目(14項目)について表-16に示す。また数量化理論による総合健全度の評価値については表-17に示している。一方、重み付き平均法で用いる各部材の重み係数については鋼橋およびコンクリート橋に分けて図-12に示している^{1),15)}。また、各解析結果についてそれぞれ図-13および図-14に全体的な分布を円グラフで示す。

合健全度はOK~IIの4段階で評価される。一方、重み付き平均法では橋梁が完全に健全な状態で S_i は最大値の5.0となる。ここで前述したように、健全度指数による解析において対象としたデータ(全2552橋)の内、橋梁健全度指数を算出することができない橋梁を省していることより、ここでも同様に削除し、データ総数は2238橋として解析する。

それぞれの解析結果について表-14および表-15に

(2) 橋梁健全度指数による解析結果との比較

数量化理論および重み付き平均法による解析結果と本論文における橋梁健全度指数による解析結果を比較検討する。まず、解析結果の全体的な傾向について比較する。数量化理論による解析結果との比較では、図-11および図-13より健全度指数90以上を数量化理論における評価OK,また健全度指数70~90を評価IV,健全度指数50~

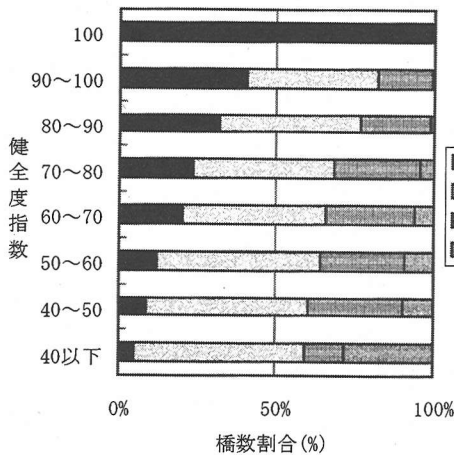


図-15 数量化理論による解析結果との比較

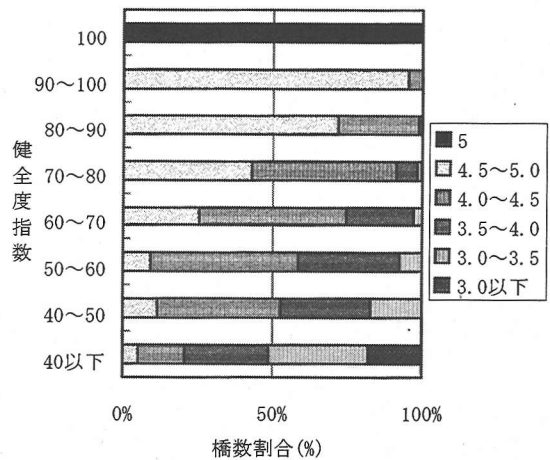


図-16 重み付き平均法による解析結果との比較

70 を評価Ⅲ，更に 50 以下を評価Ⅱと考えると，ほぼ同程度の割合となっている．一方，重み付き平均法による解析結果との比較では，図-11 および図-14 より健全度指数 100 は橋梁が完全に健全な場合であることから S_i は 5.0 となるが，その他，健全度指数 80~100 を S_i :4.5~5.0，健全度指数 60~80 を S_i :4.0~4.5，健全度指数 40~60 を S_i :3.5~4.0，最後に健全度指数 40 以下を S_i :3.5 以下と考えると，ここでもほぼ同程度の割合となっている．以上のことから，これら 3 つの解析結果において健全度評価値の全体的分布は同様であると言える．なお，本論文の解析において対象とした橋梁の建設年代について本論文では触れていないが，供用年が 20 年~40 年のものが支配的である．前述したように各橋梁の現在の資産価値の評価内容には，現在までの維持補修経費の大小に依存する点も無視できない．本論文の資産価値の評価においては，これらの影響は無視しているが，将来ライフサイクルコスト (LCC) を考慮して社会資産を検討する際には橋梁の初期建設費，維持補修経費およびユーザーコストの 3 項目を考慮して検討すべきである．

次に個々の橋梁の判定結果に着目して解析結果を比較したものを図-15 および図-16 に示す．横軸は橋数割合 (%) を示しており，全橋梁 (2238 橋) を健全度指数により 8 段階に区分した場合における区分毎の数量化理論および重み付き平均法による健全度評価結果との比較である．

図-15 より数量化理論との比較では，評価 OK の橋数割合は健全度指数の低下に伴い減少し，また評価Ⅱの橋数割合は健全度指数 40 以下の場合を最大 (全体の約 30%) として，健全度指数の上昇に伴いその橋数割合は減少する．評価Ⅳおよび評価Ⅲに関しては，健全度指数 100 以外で評価Ⅳが約 50%，評価Ⅲは 20~30% 程度となっている．一方，図-16 より重み付き平均法との比較では， S_i :5.0

および S_i :3.0 以下の場合を除いては，健全度指数により橋数割合はそれぞれ増加または減少傾向を示している．

数量化理論による解析では，理論自体が定量的な統計学的手法であることより，多少の誤差が含まれる^{26), 27)}と考えられるものの，大きな相異としては各部材の重み係数の決定方法にあると考えられる．数量化理論による解析および重み付き平均法による解析は共に，橋梁全体としての健全度に対する各部材の重要度を重み係数としているのに対し，橋梁健全度指数においては各部材の資産価値，すなわち建設費を重みと考えている．この結果，健全度指数による解析では，建設費が高価である部材は重みが大きくなり，各部材の損傷状況を経済的視点から評価した結果になっていると考えられる．

6. 結論

本論文では橋梁の資産評価に用いる各部材の単価設定および検討，個々の橋梁における健全度指数の解析，および他の橋梁健全度に関する解析結果との比較・検討を行った．この結果，得られた事項について要約すると以下ようになる．

- (1) 橋梁点検データの精度および橋梁工事実績値等を十分に考慮して，ほぼ妥当な各部材の単価決定および資産評価をすることができた．
- (2) 各部材の単価および橋梁点検データを用いて個々の橋梁の健全度指数を算出した結果，橋梁を資産として橋梁の損傷状況から経済性を考慮した評価が可能であることを確認した．
- (3) 橋梁健全度指数の解析結果と著者らがこれまでに解析した数量化理論に基づく橋梁健全度ランクに

関する結果と比較し、両者の対応関係が明確となった。

本論文における各部材の単価決定は、標準的な形式を基にしていることから、橋梁点検データ全てを活用する形式を取っていない。従って、更に検討を重ねてより多くの構造形式についての単価を決定する必要があると思われる。

本研究の目的は長期的な視点で橋梁維持管理のための合理的な維持管理計画を立案できるシステムを開発することにある。本論文の解析結果における橋梁健全度指数は橋梁の社会資産としての価値を評価するもので、各部材の物理的状況に対して、経済性を含めた健全度評価値となる。この橋梁健全度指数は橋梁ネットワーク全体としての現況の把握、並びに経済的効果の将来予測に活用でき、この活用法については今後の検討事項である。

橋梁の資産価値の総合的評価においては、橋梁各部材の経年的損傷や地震等による損傷を劣化要因として評価する観点の他に、補修補強による資産価値の増加、及び設計で想定した性能が適切であったために構造が長持ちすることによる資産価値の水準維持の影響など今後詳細に検討すべき課題も多い。

また、Caltrans の Richard W. Shepard 氏によれば、Caltrans では州内の各橋梁の健全度指数を 80%以上となることを目指しているとのことであり、今後の維持管理水準の指標となるものである。

謝辞：本研究の解析においては以下の方々には有益なアドバイスをいただきました。ここに感謝申し上げます。

B. Yanev 博士（ニューヨーク市）、R. W. Shepard 氏（Caltrans）、網淵純氏（三菱重工業㈱）、次村英毅氏、外山義春氏、安江哲氏（北海道開発コンサルタント㈱）、三田村浩氏（開発土木研究所）、山崎智之氏（北見工業大学）

参考文献

- 1) 大島俊之、三上修一、山崎智之、丹波郁恵：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、土木学会論文集、No. 675/I-55, pp. 201-217, 2001.
- 2) 土木学会：橋梁振動モニタリングのガイドライン、構造工学シリーズ 10, 2000. 10.
- 3) Fu-Kuo Chang: *Structural Health Monitoring 2000*, Technomic Publication, 1999.
- 4) 三木千寿、伊藤裕一、後藤清彦：疲労損傷に対する補修事例のインターネット上データベースの構築とその利用、土木学会論文集、No. 668/I-54, pp. 271-281, 2001. 1.
- 5) 三木千寿、水ノ上俊雄、小林裕介：光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発、土木学会論文集、No. 686/VI-52, pp. 31-40, 2001. 9.
- 6) Yanev, B.S.: Bridge Management for New York City, *Structural Engineering International*, No. 3, pp. 221-215, 1998.
- 7) Yanev, B.S.: Infrastructure management systems applied to bridges, *Proceedings of the International Symposium on Advances in Operation and Maintenance of Large Infrastructure Projects*, Copenhagen/Denmark, 1998.
- 8) Yanev, B.S. and Chen, X.: Life-Cycle performance of New York City bridges, *Transportation Research Record*, No. 1369, Materials and Construction, pp. 17-24, 1993.
- 9) 串田守可、宮本文徳、中川正樹：橋梁診断エキスパートシステムにおける知識獲得手法およびシステム信頼性向上に関する研究、土木学会論文集、No. 598/I-44, pp. 47-63, 1998. 7
- 10) 北田俊行、関惟忠、松倉孝夫、西岡敬治、岩崎一好、矢野幸子：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, pp. 897-906, 1995. 3.
- 11) 山口亮太、伊藤裕一、三木千寿、市川篤司：社会的損失を考慮した道路橋のライフサイクルコスト評価の試み、構造工学論文集、Vol. 47A, pp. 983-998, 2001. 3.
- 12) 河村圭、宮本文徳、中村秀明、小野正樹：Bridge Management System (BMS)における維持管理対策選定システムの開発、土木学会論文集、No. 658/VI-48, pp. 121-139, 2000. 9.
- 13) 宮本文徳、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.
- 14) 宮本文徳、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.
- 15) 森弘、大島俊之、三上修一、天野政一、井上実：コンピュータ・グラフィックスと数値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, 1988.
- 16) 森弘、大島俊之、三上修一、阿部芳昭、山本洋一：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.
- 17) 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, 1998.
- 18) Thompson, P.D., Small, E.P., Johnson, N. and Marshall, A.R.: *The AASHTO Ware Pontis Bridge Management System*, Technical Report, Caltrans, 1999.
- 19) Shepard, R.W. and Johnson, M.B.: *California Bridge Health Index -IBMC-005*, Technical Report, Caltrans, 1999.
- 20) Thompson, P.D., Small, E.P., Johnson, M. and Marshall, A.R.: *The Pontis Bridge Management System*, *Structural Engineering*

International, Vol. 8, No. 4, 1998.

- 21) AASHTO: *PONTIS User's Manual*, Release 3.2, 1997.
- 22) 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.
- 23) 杉本博之, 首藤諭, 後藤晃, 渡辺忠明, 田村享: 北海道の橋梁のユーザーコストの定量化の試みとその利用について, 土木学会論文集, No. 682/I-56, pp. 347-357, 2001. 7.
- 24) 東北地方建設局: 道路橋計画設計資料, 2000. 4.
- 25) (社)日本道路協会: 道路年報(S49~S52年度版), 1981. 11.
- 26) 田中豊, 垂水共之, 脇本和昌: 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.
- 27) 大橋健一, 青山吉隆: 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.
- 28) 本間美樹治, 大島俊之, 三上修一, 平井篤夫: 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.
- 29) 平成晴, 本間美樹治, 村上昭治, 三上修一, 大島俊之, 丹波郁恵: 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.
- 30) 平成晴, 丹波郁恵, 工藤英雄, 東海林めぐみ, 三上修一, 本間美樹治: 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.
- 31) 丹波郁恵, 三上修一, 平成晴, 大島俊之, 山崎智之, 佐生壽和: 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, 土木学会第54回年次学術講演会, I-A224, pp. 448-449, 1999. 10.
- 32) 丹波郁恵, 工藤英雄, 熊谷宏之, 大島俊之, 三上修一: 橋梁健全度評価における因子分析および部材損傷との関連性, 土木学会第55回年次学術講演会, I-A322, 2000. 9.
- 33) 平成晴, 大島俊之, 三上修一, 本間美樹治, 村上昭二, 水元尚也: 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.
- 34) 平成晴, 佐生壽和, 丹波郁恵, 大島俊之, 三上修一: 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.
- 35) 丹波郁恵, 大島俊之, 三上修一, 山崎智之, 本間美樹治, 平成晴: 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.
- 36) 丹波郁恵, 大島俊之, 本間美樹治, 三上修一, 工藤英雄, 平成晴: 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.
- 37) 丹波郁恵, 大島俊之, 三上修一, 佐々木聡, 次村英毅, 池田憲二: 橋梁の健全度指数評価に用いる部材単価の積算方法の検討, 土木学会北海道支部論文報告集, 第57号, pp. 182-183, 2001. 2.

(2001. 3. 12 受付)

ASSET EVALUATION OF EACH BRIDGE MEMBER AND ANALYSIS OF BRIDGE HEALTH INDEX (BHI)

Toshiyuki OSHIMA, Shuichi MIKAMI, Ikue TAMBA, Satoshi SASAKI and Kenji IKEDA

As bridge is a part of road network and social asset, the asset value of bridge is dealt with in this paper. Degradation of member is considered as the decrease of asset value. To evaluate the asset value of a whole bridge, each asset value of structural member is investigated. Taking each structural dimension into account, the initial cost of a whole bridge can be calculated as an asset value. Inspection data given by bridge inspection manual is used as deterioration factor and present remaining asset value is evaluated including deterioration. Taking the ratio between a remaining asset value and initial cost, the ratio is called Bridge Health Index (BHI). And those result of BHI is compared with the result of previous paper¹⁾ and validity of BHI is analyzed.