

橋梁点検実測データに基づく橋梁資産劣化予測評価の検討

Investigation of Evaluation and Estimation of Bridge Asset Deterioration
Based on Inspection Data

竹田俊明*, 大島俊之**, 佐藤誠***, 三上修一****

Toshiaki TAKEDA, Toshiyuki OSHIMA, Makoto SATO and Shuichi MIKAMI

*正会員 工修 財団法人北海道道路管理技術センター (〒060-0807 札幌市北区北7条西2丁目)

**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)

***正会員 株式会社ドーコン 構造部 (〒004-8585 札幌市厚別区中央1条5丁目4-1)

****正会員 博士(工学) 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)

In order to evaluate the long-term bridge health condition, the appropriate and applicable method for deterioration estimation, is needed and investigated in this paper. Not only to investigate the individual bridge condition, but to evaluate overall deterioration trend, probabilistic transition method based on Markov probability theory is applied in this deterioration estimation. As to check the estimated deterioration the comparison with the actual inspection and maintenance data for the bridges in targeted area was done on each bridge elements. The applicability of the proposed deterioration estimation method on bridge health index (BHI) is also analyzed.

Key Words: Bridge Management System (BMS), Bridge health index,

Deterioration prediction, Inspection

キーワード: 橋梁マネジメントシステム(BMS), 橋梁健全度, 劣化予測, 点検

1. はじめに

本論文は橋梁各部材の劣化予測を対象として実際の点検データの実績に基づいて現象論的、確率論的立場から検討している。橋梁の維持管理のためのBMS(Bridge Management System)においては、将来の維持管理経費の予測や橋梁のLCM (Life Cycle Management) として維持補修工事の最適化が必要である¹⁾。そのため橋梁各部材の劣化傾向を自然条件や荷重条件に応じて把握する必要がある。著者らは別に交通荷重と環境条件の連成などを考慮した床版の劣化予測の研究^{2), 3)}などを実施しているが、本論文では北海道の国道橋に関する膨大な点検データの蓄積を活用して、橋梁各部材の劣化傾向をマルコフ理論の遷移確率を応用して検討するものである。

マルコフ遷移確率を応用する研究の歴史は古い^{4) 5)}。特に本論文に関連する構造劣化に直接応用している研究としては福田ら^{7), 8)}の研究があり、舗装構造の劣化解析にマルコフ遷移確率過程を応用している^{9) 17)}。

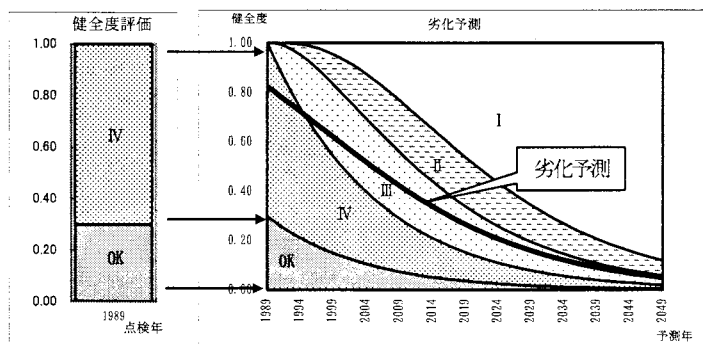
今後多くの橋梁が架替えを必要とする更新時期を迎えることになるため、補修や更新に必要な費用は、今後爆発的に増加すると言っても過言ではない。このような橋梁の更新が容易に許されない状況の中、戦略的な維持管理により社会資本ストックの延命化を図ることが急務の課

題となっている。これらの状況から以前より橋梁の維持管理システムとしてBMSが研究されてきた。一方、近年はアセットマネジメントへの取り組みが盛んに行なわれているため、この社会情勢を反映し経済性や透明性、責任原理、社会的信頼が問われるようになり、その対応として費用便益、ライフサイクルコスト(LCC)の最小化、アカウンタビリティ、リスクやクライシスの管理といった金融工学や経済学、さらにはリスク工学的な要素を考慮可能なことがBMSに求められている。しかしながらアセットマネジメント中の1つのマネジメントシステムであるBMSにおいても、数々の問題点を克服する必要があると実用化が進んでいないのが現状である。

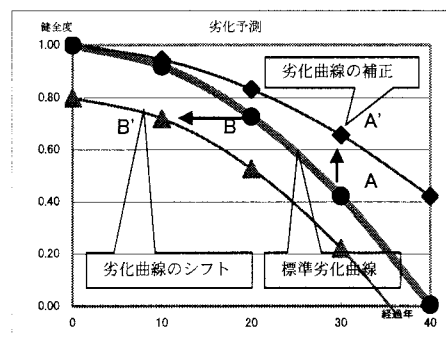
本研究では、このような状況を踏まえ、BMSの利用を前提として、橋梁資産の劣化予測を、実測の橋梁点検データに基づき算出する手法と、その評価について検討することを目的としている。

2. BMSにおける橋梁資産劣化予測の位置付け

BMSは、現在国内でも数多くのシステム^{18) 22)}が構築されそれぞれの状況に応じた利用方法が取られている。一般的に多くのBMSが持つ機能は



(a) 健全度の評価をそのまま劣化予測として使用可能



(b) 健全度に応じて曲線の変更が必要

図-1 確率理論を用いた劣化予測と理論式を用いた劣化予測の概念対比

- ①点検・橋梁諸元データの管理
- ②健全度の算出
- ③将来劣化の予測
- ④補修の事業計画

がその主な機能とされている。著者らはこれまでにこの4つの機能に対し①点検・橋梁諸元データの管理に対しては、点検データとして昭和63年に土木研究所が作成した橋梁点検要領(案)(以下点検要領と略記)²³⁾を用いた橋梁点検結果と、全国的に整備されているMinistry of Construction Highway Information(以下MICH Iと略記)データを中核としたデータベースを利用している。②健全度の算出に対しては、数量化理論Ⅱ類を用いた総合的健全度^{24)・25)}Stや、橋梁各部材の資産価値に着目した橋梁健全度指数(Bridge Health Index, BHI)²⁶⁾を用いた評価手法を提案している。③将来劣化の予測に対しては、劣化要因として凍害、塩害、中性化、アルカリ骨材反応について²⁾、部材として鋼材の塗膜劣化³⁰⁾や床版疲労³¹⁾について基礎的な研究を行い個別の劣化予測として検討してきた。④補修の事業計画に対しては、補修必要度レベル(Maintenance Necessity Level, MNL)³⁰⁾による補修優先順位付けや、既に構築しているBMSにより効果的な補修計画を行なっている。

BMSはこのように機能別には既に有効利用が可能であるが、劣化予測の機能については多種多様な形式や材料を持つ橋梁の全部材に対し、全ての損傷要因に対応した劣化予測を行なうことは、現時点ではまだ課題が多い状況にある。劣化予測の結果を用いて補修事業を計画する場合、相対的な比較が可能となるように同一の尺度で劣化が予測されている必要がある。また事務所や路線ごとにマクロ的な評価をする場合、データの不足や構造形式の特殊性などから健全度評価や劣化予測が算出できないものがあり、それらを除いての評価や検討は信頼性が低い結果となり問題がある。

以上のことからBMSでは、多くの橋梁の健全度が推移する状態を長期的に把握し、BMSとして活用するために全橋梁に適用可能な劣化予測の手法を検討することを目的とする。そのため①既存の点検データを有効活用し確率理論を用いて劣化予測が可能な手法を提案し、②算出した劣化予測手法の妥当性を検証し、③これまでの橋梁健全度指数の評価に対する劣化予測手法の適用を検討するものである。

なお、本論文で用いている橋梁各部材に関する劣化度ランクは、前述の点検要領²³⁾の判定区分に基づいて求められているものである。また同じく健全度指数は、各部材の健全度(劣化度)に部材毎に異なる重み係数を乗じて重み付き平均法により橋梁全体の健全度を算出しているものである^{28)・29)}。

3. マルコフ遷移確率を用いた劣化予測

(1) 劣化予測の現状

構造物の劣化予測に関しては、既に各研究者により多くの検討が行われている。劣化予測は橋梁を構成する部材の材料に着目した場合、コンクリートでは塩化物イオン濃度、中性化深さ、塩分付着量、アルカリ骨材反応、耐荷性を考慮した検討があり、鋼材では腐食面積率、塗装の膜厚測定、板厚測定結果を評価することで、劣化予測が可能となっている。このことから個々の部材に対しては、詳細な調査や設計資料から必要となる条件を揃えることで理論的に劣化予測が可能である。また示方書や診断マニュアルなどの理論式を用いることでも個別の対応は可能となっている。

点検が行われている現場では損傷は複合的に生じている場合が多く、その要因解明にはサンプルの採取や実橋での試験等が必要となる。しかしながら、現在の社会情勢を考慮した場合、このような多くの時間と費用のかかる調査を全ての橋梁に対して実施することは困難である。加えて架設年次の古い橋梁では、設計資料が揃わないケースも多く机上での予測も困難なことがある。そのためBMSへ適用する場合は、予測のモデル化や実験結果から導き出した回帰式、標準的な理論式の利用、マルコフ理論などの確率論、エキスパートや遺伝的アルゴリズムなどを利用する手法が取られている。本研究ではこれらのうち、単純マルコフ理論に着目した劣化予測手法について提案する。

(2) マルコフ過程による劣化予測の着眼点と問題点

今ある事象をもとに、将来的な状態を予測する手法としてマルコフ過程による予測がある。

本研究でマルコフ過程に着目している点は、図-1(a)に示すように点検結果の健全度評価をそのまま劣化推移の初期値として利用できるところにある。例えば図-1(a)中の劣化予測結果(太い実線)を床版劣化予測の例に当ては

めると、床版の各パネルの損傷ランクをそのパネル数に応じて平均した予測の結果となる。すなわち 1989 年には全パネルのうち約 70%が損傷ランクⅣ (損傷係数 0.75)、30%がOK (損傷係数 1.00) で床版全体としての健全度が 0.825 ($=0.75 \times 0.7 + 1.00 \times 0.3$) であったものが年度の経過とともに各損傷ランクのパネル数の変化として推移し、健全度が低下する状況が理解出来る²⁹⁾。点検による健全度の評価結果は、ひびわれや腐食といった損傷状態を種類分けしてそれぞれランク付けしている。しかし、損傷原因に対しては明確な評価は行なわれていない。損傷の評価結果を基にその後の劣化を予測する場合、劣化要因に着目した予測式や標準的な劣化曲線では、損傷状態を式上のどの点に位置するのかを関連付ける必要がある。また、図-1(b)に示すように算出した標準劣化曲線の結果と、点検時の点検結果が A→A'、B→B' のように損傷ランクの値や、ランクへの到達年が異なる場合には、点検結果から得られた劣化曲線に対して予測式の補正やシフトを行なう必要がある。さらに、実際はいくつかの劣化要因により損傷が発生している複合劣化の場合は、目視を基本とする点検結果のみで損傷要因別の劣化式を選定するのは困難といえる。これに対し、健全度評価の 1 つである BHI を用いて劣化予測を行なう場合、複合劣化の状態を加味した健全度評価として表すことができ、その結果がそのまま劣化予測の初期値として利用可能であるため有効な手法と考えた。

単純マルコフ過程を BMS で用いる場合の問題点は、遷移確率をどのように算出するかである。遷移確率の算出は、毎回や毎年といった一定の間隔で収集されたデータを基にするのが一般的である。対象となるデータが多く、且つそのサンプルの状態が定期的に取られているような場合、遷移確率の算出は容易で、一般的にも遷移確率の利用は有効であることが広く知られている。その反面、データ数が少ない場合やサンプルの間隔が不規則な場合の適用は困難であり、それらの場合はモンテカルロシミュレーション等に見られるシミュレーション手法によりデータを発生させるような方法が考えられている。

本論文で利用の対象としている点検データは、15 年以上にわたり、3000 橋以上の点検が実施されているため、蓄積されているデータ量としては十分であるが、その点検間隔が一定ではない。これまで橋梁点検は点検要領の規定によりおよそ 10 年間隔で点検を実施することになっているが、北海道では実際のところ点検間隔は損傷状態や橋梁管理者の判断により 1 年から 14 年と非常にばらつきがある。そのため前述したようにマルコフの遷移確率を用いる場合、点検データを基に遷移確率を算出することは問題があった。間隔が異なるデータから遷移確率を導き出す手法としては、点検間隔が同じデータのみを対象とする方法、例えば 3 年確率と 6 年確率が存在した場合、3 年確率のマトリクスをさらに乗じたものが 6 年確率として取り扱うことを定義して算出する方法、関連する遷移度数マトリクスに対し各要素の差の二乗和が最小となるように繰り返し計算により求める方法³²⁾、損傷ランクの推移を劣化の推移速度として取り扱う手法が提案されている³³⁾。これに対

して本論文では

- ① 全ての橋梁の各部材に劣化予測を適用する
- ② 点検間隔のばらつきを考慮する
- ③ 北海道の劣化状況の特性を考慮する

ことが必要であるため、これらの要件を網羅し、次に示す条件において、遷移確率が算出可能な手法を提案し検討した。

(3) 確率モデルの前提条件

マルコフ過程で用いる遷移確率行列 (1 次) は一般的に式(1)のように表される。

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \cdots & P_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

本論文で取り扱う遷移確率行列は、点検評価結果を基にランク毎の推移をモデル化するものである。橋梁点検では、損傷ランクを損傷の無い健全な状態から早急に対応が必要な悪い状態までを OK から I の 5 段階で評価しているため、マトリクスを 5 行 5 列とする。次に劣化の対象とする要素は、劣化が進行する過程の確率変数として算出するため、対角線から右上の項目とする。左下の項目は、年度毎の事象を N とすると、N+1 では損傷のランクが N の時よりも健全になる。これは補修等が実施されたものと判断できるため別途補修後の劣化予測として考慮することとし、今回の対象からは除外した。さらに、点検間隔が長い場合や劣化の進行度合いが早い場合は、前回の点検ランクとその次の点検ランクが段階的でない場合があるが、これは例えば前回の点検結果が OK であったものが、今回の点検でランクがⅡとなった場合は OK→Ⅳ、Ⅳ→Ⅲ、Ⅲ→Ⅱの経過を両点検の間にランクが順に変化した結果であるとし、ランクを維持する確率、つまりランクがその状態を保持することができる確率と、遷移する確率に分類することとした。

以上の条件からマトリクスは式(2)に示す対角線上の要素 (状態保持) とその右に隣接する要素 (状態遷移) についての遷移確率行列とした。

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_{22} & P_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & P_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{55} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(4) 個別の遷移確率年を算出する方法の提案

遷移確率の算出には、既存の橋梁点検データを用いるが、3. (2)項で述べたように実際の点検データはその点検間隔

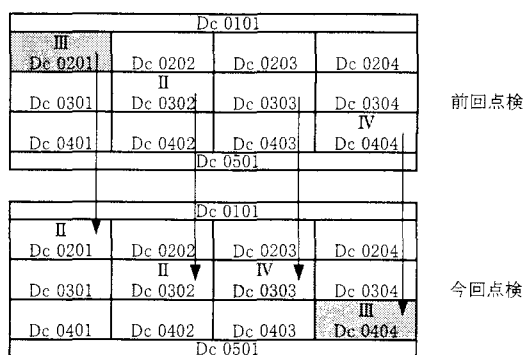


図-2 劣化対象部材の考え方 (床版下面イメージ)

が一定ではない。そのため、個々の点検間隔年で遷移確率を算出することは可能であっても全データに対する遷移確率を算出するには問題があった。そこで以下に示す手法を提案し、全データの遷移確率を算出することとした。式(2)で示した遷移確率行列を1年間での遷移確率とした場合、 N 年後 (N 次) の遷移確率は

$$\mathbf{P}^{(N)} = \mathbf{P}^{(N-1)} \mathbf{P} \quad (3)$$

で表される。

この式(3)を繰り返し行なうことで次の式(4)に示す基本的な定理が証明されている。

$$\mathbf{P}^{(N)} = \mathbf{P}^N \quad (4)$$

ここで、式(4)を用いて遷移確率を算出するために N 年の確率が50%となる確率として式(5)を設定する。

$$\mathbf{P}^N = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)は損傷に対して何も対処を行なわない場合、ある損傷状態が次の損傷状態に0.5 (50%) の確率をもって N 回目 (N 年) で遷移することを意味している。0.5の設定については原子物理学で使用されている「半減期期間」の概念を参考として設定したものである^{34) 37)}。しかし、ランダムな間隔で点検間が実施されている北海道のデータでは、算出した確率 $\mathbf{P}^N$ での N は、一定ではない。そこで式(5)の行列の各要素 P_{mn} に対してランクごとに推移を表す式として式(6)を設定し、

$$P_{mn} = 10^{\frac{\log 0.5}{N_{mn}}} \quad (6)$$

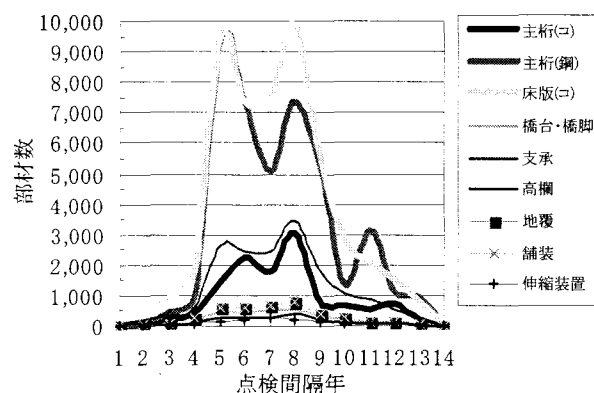


図-3 点検間隔年別対象部材数

これを N_{mn} について変形式(7)とした。

$$N_{mn} = \frac{\log 0.5}{\log P_{mn}} \quad (7)$$

式(7)より各点検間隔年毎の遷移確率が50%確率になる遷移確率年をランク毎の要素として算出し、それらを全点検間隔データの平均遷移確率年としてマルコフ過程マトリクスの対角線上の遷移確率 (P_{11} , P_{22} , P_{33} , P_{44} , P_{55}) に変換する。つまり50%での確率を固定した式(7)を用いて遷移確率年 (N_{mn}) を個々に算出することで点検間隔の異なるデータを扱うことが可能となる。

(5) 解析データ

解析に必要となるデータは、北海道開発局が管理する国道橋においてS63年からH14年までの15年間に点検された3369橋 (複数回点検含む) のデータを基に健全度評価で用いている9部材に対し、経年劣化が点検データから確認可能な部材として基礎を除く8部材について損傷の点検毎の推移を集計した。図-2は前回点検と今回点検の間でランクの推移を評価する部材を点検要領に記載されている床版下面のパネル図を用いてコンクリート床版を下から見た点検箇所を示したものである。劣化予測の集約単位は、主桁と横桁や対傾構で区分された床版パネル単位 (図中で、例えばDc 0302が1パネルでランクⅡを示し、Dc 0101, Dc 0501は、張り出し床版部で健全な状態を示す) に集約し、ランク毎に比率を算出することとした。これまで取られてきた点検評価の結果は、橋梁毎や径間毎に最大のランクを使用していたがその場合、同一径間内の別の箇所で損傷が次回点検までに発生した場合にその影響を受けてランクが変動するためにランクの推移が当初の損傷とは異なる可能性があった。そこで本解析では1パネルを1部材とし、それぞれのパネルに対しての劣化を追跡する方式を採用し、新たに集計した結果を基に遷移確率を算出することとした。

(6) データ数のばらつきの考慮

図-3は、点検間隔年別に対象となった総部材数を示したものである。図より点検間隔年が5から8年までは多くの点検が実施されているが、その前後では部材種別によってはその傾向に多少の違いがあるものの極端に数が少ないことがわかる。そこで平均の遷移確率年、点検間隔年のデータ母数のばらつきを考慮して対象とする部材毎に信頼区間が95%の点検間隔のデータを使用することとした。全ての点検間隔年の確率年を平均化する時点では、全点検間隔年の部材数に対する各点検間隔年の部材数で重量平均した値を用いて算出した。なお、単純平均と重量平均での確率年の差異は平均で1.13倍と大きな違いは見受けられなかったが、最大では1.62倍の違いが生じる結果であったため重量平均を用いた。

4. 解析結果と考察

これまで述べてきた提案手法に基づき解析した主な結果を以下に示す。解析結果は部材単位とし、結果よりさらに検討が必要と考えられた部材については、別途解析を実施し合わせてまとめている。

(1) 主桁劣化の遷移確率

表-1及び表-2はそれぞれコンクリート主桁の遷移確率年と遷移確率を示したものである。遷移確率の分析に用いたデータは、3.(6)項を考慮した11616部材を対象とした。例えば表-1の遷移確率年 N_{II} =19.506は全データ11616個のうち各点検間隔においてOKがOKに留まっていたデータ数の統計分布より経過年毎に現状に留まる遷移確率 P_{II} とみなしている。また式(7)により遷移確率年 N_{II} を計算する際には、図-3の分布のような当該する部材数のばらつきを考慮して3.(6)で述べた重量平均により算出している。また、(I, I)の1.000は、計算上は無限大となるが、実際のデータでは、この項は解析の対象外としているため、便宜的に1.000としている。図-4は、表-2の遷移確率を基に縦軸に健全度指数、横軸に経過年とした健全度指数の経年推移を劣化予測としてグラフ化したものである。表-1及び表-2からは、遷移確率年や遷移確率のランク毎の劣化速度(年)の違いを把握することが可能である。図-4の曲線と経年の交点より48年後には健全度指数が0.25になることを示している。これは点検要領におけるランクⅡに相当するもので、点検要領の判定では補修の対象となるランクに到達すると予測される年数を示した結果となる。

ここで、点検結果の損傷ランクは、健全度指数として表すことが可能であると同時に、その後の経過年に対する損傷ランクの推移(劣化の進行)を表すことも可能である。例えば図-1(a)および表-2の値を用いると、点検時に0.825であった健全度指数は、1年の経年により $0.3 \times 0.965 \times 1.00 + (0.3 \times 0.035 + 0.7 \times 0.739) \times 0.75 + (0.7 \times 0.261 + 0.0 \times 0.879) \times 0.50 + (0.0 \times 0.121 + 0.0 \times 0.500) \times 0.25 + (0.0 \times 0.500 + 0.0 \times 1.000) \times 0.00 = 0.777$ として劣化予測が可能で、健全度指数の低下として劣化レベルとの関係を表すこ

表-1 主桁の遷移確率年

	OK	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
OK	19.506				
Ⅳ		2.291			
Ⅲ			5.370		
Ⅱ				1.000	
Ⅰ					1.000

表-2 主桁の遷移確率行列(状態保持・状態遷移)

	OK	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
OK	0.965	0.035			
Ⅳ		0.739	0.261		
Ⅲ			0.879	0.121	
Ⅱ				0.500	0.500
Ⅰ					1.000

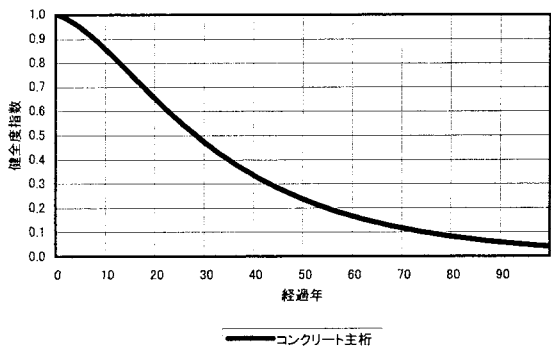


図-4 主桁の劣化予測

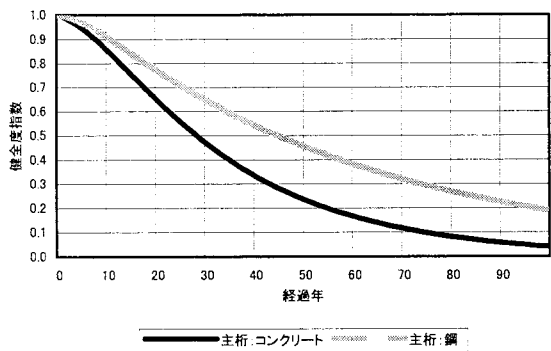


図-5 主桁の材料による劣化の影響

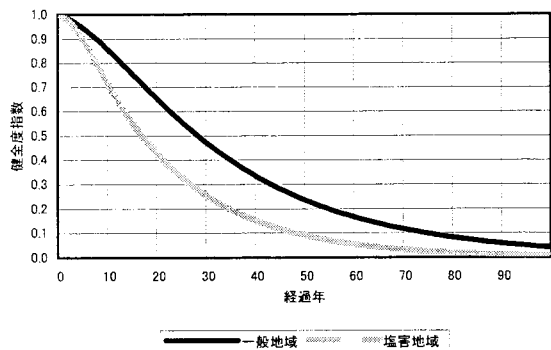


図-6 主桁の環境条件による劣化の影響

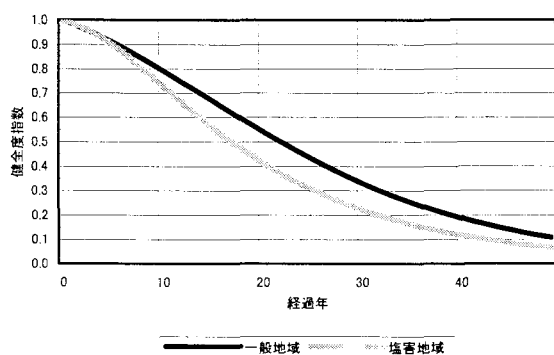


図-7 床版の劣化予測

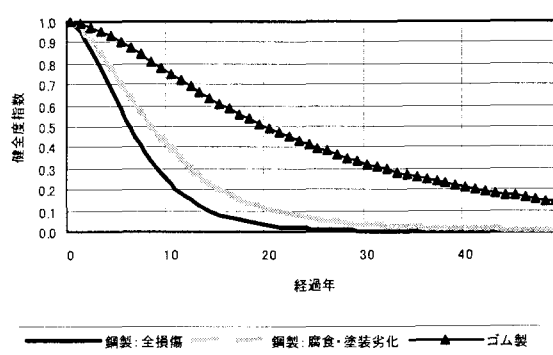


図-9 支承の劣化予測

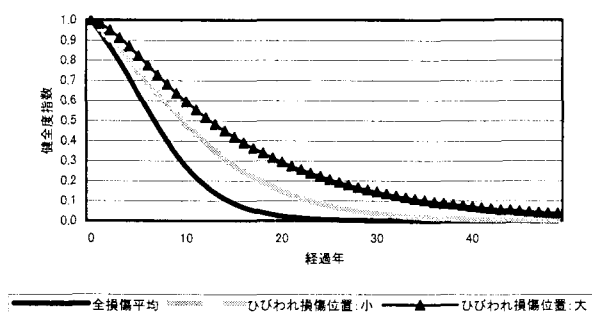


図-8 躯体の劣化予測

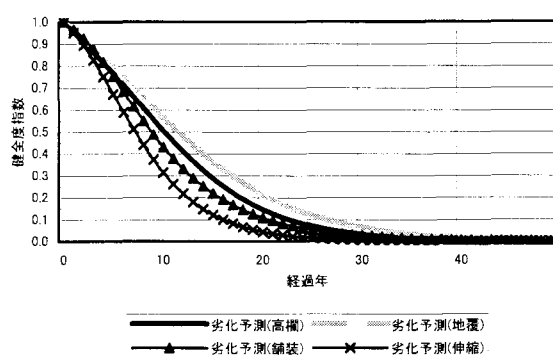


図-10 その他の部材の劣化予測

とが可能である。よって以降の結果については、経年変化のイメージを捉えるため、経過年に対する健全度指数の推移図として表す。

(2) 材料を考慮した劣化の遷移確率

図-5 は主桁において材料の違いを示したものである。分析に用いたデータは、主桁の材料が鋼製である 42361 部材を対象とした。図から、補修対応が必要となる 0.25 を基準とすると鋼主桁の方がコンクリート主桁より劣化が 32 年遅い傾向となった。その原因の一つとしては鋼主桁の主要な損傷である塗装劣化や腐食に対しては定期的な塗装塗替えが行なわれているため損傷が少なく、加えてコンクリート部材に多くみられるひび割れのような損傷が少ないため、健全度に影響するような損傷が少ないことが原因の一つと考えられる。

(3) 環境条件を考慮した劣化遷移確率

図-6 は架設環境の違いによる劣化影響を考慮するため、コンクリート主桁を塩害の影響を受けやすい地域と、それ以外の地域の橋梁に分類し、それぞれの劣化を算出し比較したものである。塩害地域の区分方法は、コンクリート標準示方書[維持管理編]³⁸⁾から対象となる地域に位置する橋梁とそれ以外で区分を行なっている。この結果より、補修対策が必要になる時期の経過年に達する確率年数は塩害地域がおよそ 30 年、一般地域が 48 年であり塩害地域の方が 18 年程短くなる傾向となった。これは塩害により劣

化の進行が早い度合いについての傾向を表している結果といえる。各ランクの確率年について着目すると、ランクが OK の状態では、一般と塩害地域との差は、1.46 倍(年)塩害地域が早くランクが遷移するのに対し、ランクⅣ、Ⅲではそれぞれ 2.1 倍(年)、6.0 倍(年)と劣化の進行が加速的な傾向にあることがわかる。コンクリート標準示方書[維持管理編]では、塩害による劣化進行の過程は大別して 3 つに区分されている。健全度指数との明確な区分の関係を示すことはできないものの、潜伏期にあたるランクではさほど差異が見受けられないが、進展期や加速期に劣化進行が速まる傾向をある程度表す結果となった。

他の検討結果として凍害の傾向は確認できたが、大型車交通量や適用示方書の傾向は顕著に表れず、既往の研究を参考に予測対象データの検討が必要と考えられる。

(4) 床版劣化の遷移確率

図-7 はコンクリート床版の劣化予測を主桁の場合と同じ環境条件で示したものである。分析に用いたデータは、48053 部材を対象とした。図より床版の劣化過程は、塩害地域と一般地域では床版においてもその傾向は異なり、塩害地域では補修対象時期は 29 年、一般地域では 36 年と主桁と比較するとその差は 7 年と小さいものの環境による劣化の差異を表している。また、健全な状態から初期の 5 年間では、一般地域と塩害地域では OK の遷移確率の差が 0.007 とわずかであることから損傷が発生するまでの初期の段階では、ほぼ同様な劣化過程をたどる結果である。

表-3 遷移確率比較

Case ランク	Case1	Case2	Case3
OK	0.965	0.970	0.964
Ⅳ	0.739	0.673	0.782
Ⅲ	0.879	0.814	0.919
Ⅱ	0.500	0.500	0.500
Ⅰ	1.000	1.000	1.000
相関係数		0.985	0.994

(5) 橋台・橋脚劣化の遷移確率

図-8 はコンクリー橋台及び橋脚を躯体とした劣化予測を示したものである。分析に用いたデータは、2953 部材を対象とした。コンクリート構造物の劣化予測として捉えた場合、全損傷平均の曲線は一般的に早い傾向にある。その理由の 1 つとしては点検評価方法が乾燥収縮などによるひびわれ等を損傷として記録してしまうことがある。加えて、損傷を受ける部材区分が橋台や橋脚の場合 1 つしかないため、点検要領で定められている損傷の有無が結果的に全体の評価値とされてしまい劣化が早い傾向となる。そのため図-8 では通常の補修が必要となるひびわれの損傷を抽出し、さらに点検要領に準じ、主要部材の影響を考慮すべきひびわれが発生する損傷位置：大と主要部位以外のひびわれが発生する損傷位置：小について分類した劣化予測を行なった。図より損傷位置：大が補修ランクに到達する予測年は 23 年となった。実際の補修時期に関してはこれらの劣化状況と補修工法とを考慮する必要がある。

(6) 支承劣化の遷移確率

図-9は支承の劣化予測を示したものである。分析に用いたデータは、15789部材を対象とした。損傷種別の全てを考慮した場合、図の鋼製：全損傷で示す曲線結果となる。ただし支承の劣化予測に関しては、損傷の種別がモルタルの欠損や土砂の堆積、アンカーボルトのゆるみなど、支承本体の経年劣化とは別の要因による損傷が約42%と多く含まれる。そのため支承本体の経年劣化に影響を及ぼす腐食と、塗装劣化に対する損傷のみを抽出したデータを基に劣化を予測した。その結果を図中の鋼製：腐食・塗装劣化として示す。また、材料の違いを考慮してゴム製の支承を同図にゴム製として示す。図より支承の健全度は本体以外の損傷の影響を受けていることがわかる。

(7) その他の部材劣化の遷移確率

図-10 はその他の部材として高欄(防護柵)、地覆、舗装、伸縮装置についての劣化予測を示したものである。分析に用いたデータは、それぞれ 1721 部材、3830 部材、2750 部材、1218 部材を対象とした。

高欄(防護柵)、地覆に関しては、北海道などの積雪寒冷地では、融雪剤散布や凍結融解による影響が大きいとされており、また BHI を用いた健全度でも評価しているため、

表-4 部材別相関係数

部材名	相関係数	
	Case2	Case3
主桁	0.985	0.994
床版	0.999	0.989
躯体	0.997	0.994
支承	0.999	0.956
高欄	0.973	0.925
地覆	0.938	0.974
舗装	0.912	0.937
伸縮	0.846	0.930

劣化予測を行なっている。

舗装に関しては、既に詳細な研究として PMS(Pavement Management System)³⁹⁾が開発されているが、橋上では多少条件が異なることを考慮し、また橋梁全体として評価する必要があるため管理上別途劣化予測を行なっている。

伸縮装置は、損傷の種類からは、耐用年数として時期を決定することも可能ではあるが、補修の時期を算定する必要があるため、対象として算出している。なお、鋼製とゴム系の材料の違いが伸縮装置にも存在するが、予測した補修時期の差異は確率年で 1 年であったため同種とした。

以上、資産劣化評価の対象となる部材の遷移確率を実測データから材料や架設環境を考慮して算出することで、劣化予測を健全度評価で用いた全ての橋梁の各部材に対して算出することができた。

5. 劣化予測値の妥当性の検証とその応用

5.1 予測値の妥当性検証

本論文で解析したマルコフ過程の行列式を用いて算出した結果は、遷移確率行列を用いていることから、長期的な予測を行なった場合、その予測精度は下がることが考えられる。もとより、ここで提案した手法は、劣化のメカニズムを解明し、高精度の予測を行なうことを目的としているものではなく、既設橋梁の多くに対しての劣化を同一手法で予測し、さらには相対的な評価ができることにその主眼を置いているため、現時点では高い精度を求める必要はないと考えられるが、実橋の点検データをベースとしていることから既存橋梁への適用を踏まえ、次に示す 2 つの手法を用いて妥当性の検証を行なった。

(1) 最小二乗法を用いた推定確率との相関

本論文で提案した手法を用いて算出した遷移確率の各要素の妥当性を検証するため、最小二乗法の概念を用い、繰り返し計算により算出した遷移確率との相関を求めて検証した。求める遷移確率の算出方法は、福田ら³²⁾の研究の解法を参考とし、解となる遷移確率の各要素とこれに対応する点検間隔年の遷移確率要素の差を求め、その二乗和を点検間隔数分足し合せた値が最小となるマトリクスを

表-5 補修データ項目数

構造区分	補修区分数	データ数	備考(対象)
上部工	1	305	-
下部工	1	84	-
基礎	9	84	-
主桁	4	171	○
床組	5	156	○
床版	12	1515	○
橋台	6	167	○
橋脚	4	515	○
支承	7	779	○
高欄	5	997	○
防護柵	5	1373	○
舗装	5	1266	○
伸縮装置	3	1139	○
排水装置	7	334	-
遮音壁	5	1	-
遮光壁	5	0	-
落橋防止装置	3	2792	-
その他	1	664	-

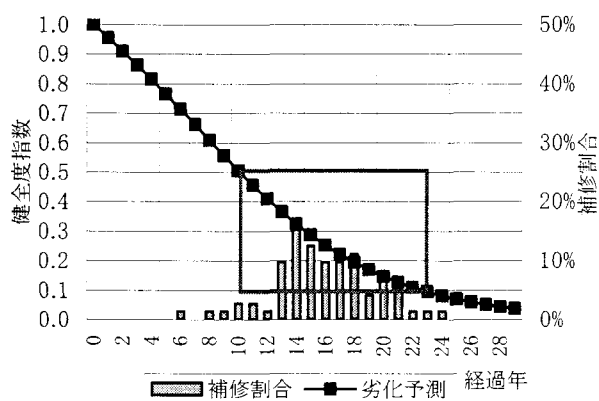


図-11 劣化予測と補修時期の割合

各行の和が1となるような条件下で繰り返し計算により求めた。ここで各要素の差は、データ数のばらつきが多いことを本論文では考慮しているため、対象部材数と確率値の2つのケースについて算出した。表-3にコンクリート主桁について、ランクごとに各ケースの遷移確率を算出した結果を対角項の要素について比較した結果を示す。表-4にランクの遷移確率の相関係数を部材ごとに算出した結果を示す。ここで表のCase1は、本論文で提案した手法を用いた結果を示し、Case2は、対象部材数を差分の要素として繰り返し計算で求めた結果、Case3は、確率の値を差分の要素として求めた結果を示す。なおCase3の場合は重量平均を行っていない。表よりCase2、Case3とも0.8以上の高い相関が得られた。これらの結果から異なる点検間隔の点検データから遷移確率を算出する方法として本論文で提案している手法を用いることの妥当性を検証することが

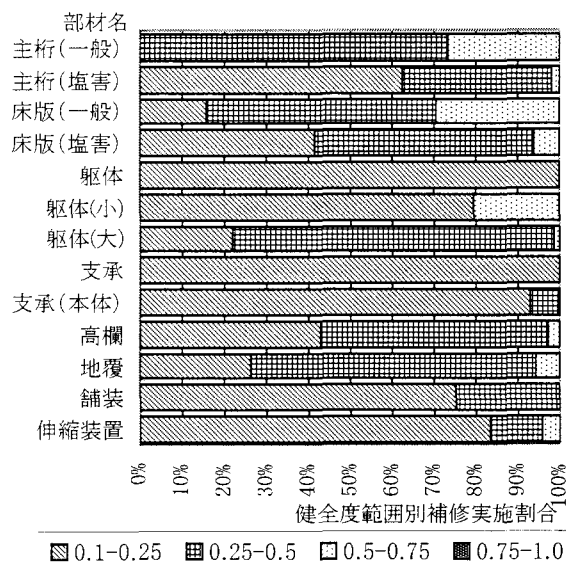


図-12 各部材の健全度範囲別補修実施割合の比較

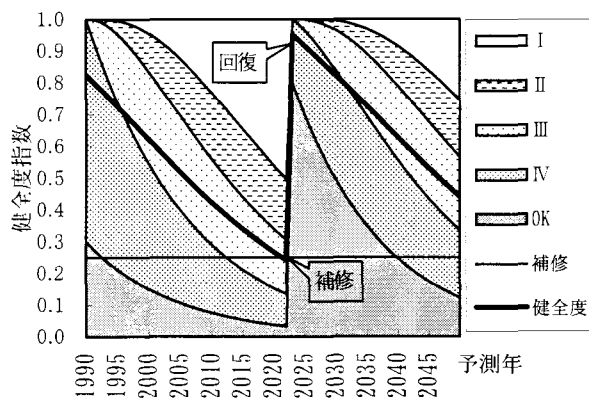


図-13 補修がある場合の劣化予測の適用例

できた。なお、本論文の予測手法と最小二乗法による予測手法の比較としては、本論文の手法の方が計算が簡易であり、計算根拠も明確な点が上げられる。

(2) 補修データとの相関

補修データとの相関はMICHIデータにある橋梁補修歴データを参考とした。このデータは橋梁に対してこれまで行われてきた補修を記録したものであり、MICHIデータでは88の項目に補修が分類されている。この内、データが存在した73項目を対象に取りまとめ、劣化予測の項目に準じて構造を区分した。その結果を表-5に示す。なお、対象データは橋梁が架設されてから補修(交換)が行われるまでの期間を取りまとめたものである。これにより既に登録されているデータ数は、1694橋で17014件の補修データが登録されている。この内、補強の対策データを除いた12342件のデータを用いることとした。図-11は、高欄の劣化予測結果とその補修時期の割合を示したものである。劣化予測と同様に健全度指数が0.25になった時点に補修の推奨時期として、劣化予測がこの値となった経過年に対し、補修事業がいつ頃行なわれたか、その割合を評価し

た。図より高欄では、健全度指数が15年目で0.25に到達すると予測されている。これに対して補修は14年をピークに健全度指数が0.5から0.1にあたる10から23年の13年間(図中の矩形範囲)におよそ95%の補修が行なわれており、このことから劣化予測による補修時期を基準にその前後の年度に補修が行なわれたことが解る。このように他の部材に対しても劣化予測データの妥当性をまとめたのが図-12である。図は補修時期が劣化予測のどの健全度範囲で補修事業を行なっている数が多いかを率化したものである。ここで健全度範囲の区分方法については、損傷係数を基に分割したものをを用いている。ただし健全度範囲が0.25の下限値は、ランクⅡからⅠへの劣化予測が行なわれていないことや部材の交換基準が点検要領でも明確な規定がないことから、ここでは0.1と定めて集計した。高欄の例でも示しているように実際の補修では当然のことながらその時期についてはある範囲を持っており、劣化予測で算出された補修実施年に対しても分布を持つため対象を0.1から0.25、0.25から0.5とした場合について評価した。その結果、部材毎に違いは見られるものの70%以上が対象範囲内で補修されている結果となった。

5.2 劣化予測の適用事例

(1) 健全度評価への適用

遷移確率を劣化予測に用いる利点は、3. (2)項でも述べた通り点検で評価された健全度の値をそのまま劣化予測の初期値として利用可能なことである。図-13に示すように点検時にOKが30%、IVが70%であった点検評価は、BHIが0.825として表すことができる。また損傷の状態(ランク)毎に異なる劣化要因で算出する場合、一般的な曲線式では複数の予測式が必要となる。そのため、縦軸の単位は煩雑となり、部材での個別評価は可能であっても橋梁単位の評価や劣化後の状態を総合的に評価することは困難である。一方、BHIによる健全度を基準とすると単一軸上での評価のまま劣化予測を行なうため、劣化後の評価や、図に示すように補修を適用した(図では健全度指数が0.25より小さくなった年)後の健全度が回復する推移も容易に表現することが可能である。

(2) 過去の過程を考慮した劣化予測への適用

マルコフの遷移確率を用いる場合、現時点(N)の状態に対し過去事象の統計結果から作成された遷移確率行列を掛け合わせることでその次の予測(N+1)を行なうことからその後の状態変化は、過去の経緯に関わらず現時点の状態が同じであれば、その後の結果が同じとなる特性を持っている。このことは、点検結果に基づき評価する健全度評価では有効となる。その理由としては点検結果が1回しか存在しないような点検であっても過去の経緯に依存せずに点検時の評価結果からその後の劣化を予測することが可能なことにある。一方、過去の経緯に依存しないことの問題として、例えば急速に劣化が進行し健全度が0.5にある床版と、緩やかに劣化が進行して健全度が0.5にある床版はその後の劣化過程が同一の遷移確率を使用するため

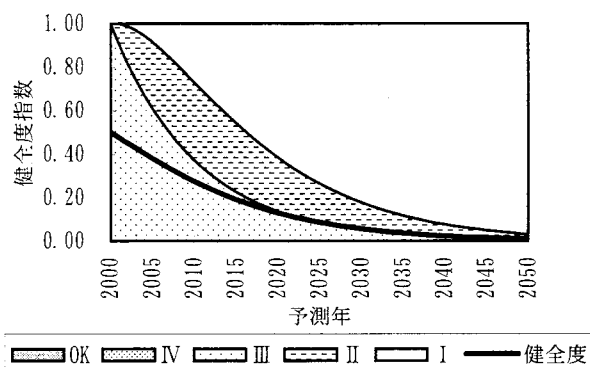


図-14 劣化予測の適用例(床版A)

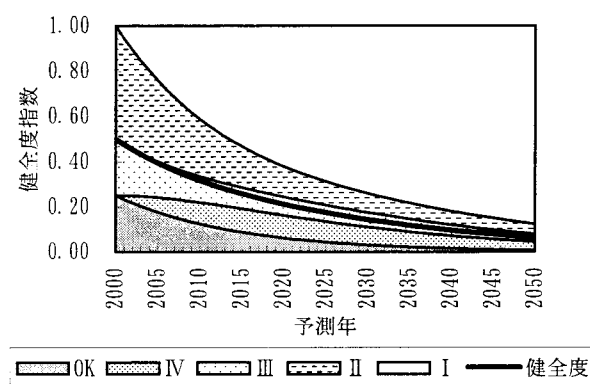


図-15 劣化予測の適用例(床版B)

に同じ劣化過程をたどることが挙げられる。ここで、本論文ではこれらの問題を考慮する手法として、ランク毎に遷移確率を算出し劣化時に使用する手法と、健全度の状態で部材が持つ損傷ランクをランク別に範囲率として配分する手法を提案している。図-14、図-15は、初期の健全度が同じ2つの床版が、各損傷ランクが占める割合の違いからその後の健全度の推移が同一とならない事例である。ここで床版A、Bは共に点検時の健全度は0.5でランク毎の遷移確率も同じ値を使用している。床版Aは点検時のランクがすべてⅢであるのに対し床版BはランクOKが25%、ランクⅢが25%、ランクⅡが50%である。本論文で提案している遷移確率はランク毎に異なる遷移確率を持ち、健全度評価で算出された損傷範囲や損傷係数²⁹⁾(OK:1.0, IV:0.75, Ⅲ:0.5, Ⅱ:0.25, Ⅰ:0.0)を考慮するため数年後の劣化予測(例えば2025年の健全度)は、それぞれ0.13と0.21と異なった結果が得られる。よって劣化予測開始時の健全度が同一の場合でもその後の劣化過程が、過去の経緯を継承して予測が可能な手法となっている。

マルコフ過程は定常確率であるから、自然対数的に変化する事象や、過去の状態の影響を受けるもの、経年に対し予測速度が異なるような劣化予測への適用は問題があるとされていた。しかしながら本論文のように劣化予測に応用することで、同一の遷移確率を用いた場合でもその初期状態が異なれば、劣化の進行程度を考慮した劣化予測が可

能となる。さらには損傷が進行する際に変化する劣化速度の違いを考慮することが可能である。

6. 結論

本論文では、マルコフ過程を用いた劣化予測において点検結果を基に全ての橋梁の各部材に対して劣化予測が可能な予測手法の提案、その係数（遷移確率）の算出方法と劣化予測値の妥当性、さらにはBMSでの利用を考え、その適用性について手法の検討を行なった。この結果を要約し、以下にまとめる。

- (1) 点検間隔の異なる全てのデータに対し、本論文で提案した手法を用いて劣化予測に必要な遷移確率を算出することができた。算出した遷移確率は、繰り返し計算で求めた値や、実際の補修データと比較することでその妥当性を検証することができた。
- (2) 橋梁点検の実測データを基にマルコフ過程を用いることで、構造形式や架設環境、損傷要因を考慮した劣化予測を全橋梁に対して算出することができた。
- (3) BMSでの一連の利用を考慮し、健全度評価への適用、ランクごとに遷移確率を算出することの有効性、さらには補修後の劣化予測への適用法について示すことができた。

今後の課題は、遷移確率に対しては、劣化予測精度の向上や、環境条件等の細分化がある。将来的には、点検回数が増えることで1橋毎の劣化予測の算出も可能になると考えられる。補修後の劣化予測に対しては、今後は補修後のデータの収集等が必要となってくるが、補修後の遷移確率は、初期の部材が持つ劣化の確率とは異なることが考えられる。そのため、補修工法や材料、その効果を考慮した劣化予測を行なうことは今後の維持管理において重要な要素の1つとなるといえる。これらの研究結果はBMSの機能としてフィードバックすることにより、BMSは健全度評価から補修の事業計画までを一連の機能として活用可能なシステムとなっていくことが期待できる。そして、はじめにでも述べたようにBMSを有効に活用し、戦略的な維持管理を実施することで、社会資本ストックの延命化を図ってきたいと考えている。

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と貢献をいただきました。ここに感謝申し上げます。R.W.Shepard氏（Caltrans）、B.Robert氏（Cambridge Systematics, Inc）、佐藤京氏、渡邊一悟氏（（独）北海道開発土木研究所）、安江哲氏、加藤静雄氏、米田直也氏（株ドーコン）。

また、本研究は平成16年度文部科学省科学研究費（代表者 大島俊之）の補助を受け行われました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会誌特集：社会資本へのアセットマネジメント導入に向けて、土木学会誌、Vol.89, No.8, pp.8-47, 2004.

- 2) 大友貴史, 大島俊之, 三上修一, 佐藤誠, 竹田俊明：確率密度関数を用いたコンクリート構造部材の複合劣化予測手法の検討, 土木学会北海道支部論文報告集, 第60号, pp.262-265, 2004.
- 3) 樋口匡, 大島俊之, 三上修一, 山崎智之, 安江哲, 竹田俊明：BMSに用いるRC床版の疲労劣化予測手法について, 土木学会北海道支部論文報告集, 第60号, pp.224-227, 2004.
- 4) Ang, A.H-S. and Tang, W.H. : Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol.II-Decision, Risk, and Reliability, John Wiley & Sons, Inc., pp.112-140, 1984.
- 5) Y.K. Lin 著, 森, 富田, 小林, 佐藤, 小林 共訳：構造動力学の確率論的方法, 培風館, 1972.
- 6) J.N. Yang and M. Shinozuka : On the First Excursion Probability in Stationary Narrow-Band Random Vibrations, Journal of Applied Mechanics, Dec., pp.1017-1022, 1971.
- 7) 柴崎由紀, 福田正：路面状態の制約を設けた舗装管理システム, 土木学会第52回年次学術講演会, V-22, pp.44-45, 1997.
- 8) 武山泰, 内村星史, 福田正：寒冷地舗装の破損遷移に関するデータ解析, 土木学会論文集, No.442/V-16, pp.147-152, 1992.
- 9) 森村英典, 高橋幸雄：マルコフ解析, 日科技連, 1979.
- 10) 米谷栄二, 佐佐木綱, 西藤立雄：マルコフ連鎖によるOD交通量の推定, 土木学会論文集, No.129, pp.15-22, 1966.
- 11) 高山純一, 杉山智美：吸収マルコフ連鎖を用いた観測交通量からのOD推計法に関する研究, 土木学会論文集, No.569/IV-36, pp.75-84, 1967.
- 12) 松保重之, 白木渡, 高岡宣善：マルコフ過程論を用いた構造物の動的解析法, 土木学会第45回年次学術講演会, I-390, pp.810-811, 1990.
- 13) 杉山毅, 西岡隆：マルコフ連鎖を用いた構造物の地震応答解析, 土木学会第50回年次学術講演会, I-821, pp.1642-1643, 1995.
- 14) 金沢勝治, 呉智深：時系列信頼性解析による劣化進行を有する脆性構造システムの破壊プロセスに関する研究, 土木学会第53回年次学術講演会, I-A158, pp.316-317, 1998.
- 15) 藤田宗久：補修を受けるシステムの信頼性と稼働率の計算手法, 土木学会第46回年次学術講演会, I-358, pp.754-755, 1991.
- 16) 増本みどり, 吉田郁政, 佐藤忠信：南海・東南海地震を対象とした既存構造物の補強戦略に関する研究, 土木学会第58回年次学術講演会, CS1-033, pp.65-66, 2003.
- 17) 足立幸郎, 藤井学, 関惟忠, 大矢敏雄, 小塚幹夫：高速道路保守管理の最適化に関する研究, 土木学会第50回年次学術講演会, I-369, pp.738-739, 1995.
- 18) 椎橋亜由美, 佐藤誠, 大島俊之, 三上修一, 池田憲二, 丹波郁恵：橋梁マネジメントシステムの開発, 土木学会第57回年次学術講演会, I-242, pp.483-484, 2002.
- 19) 池田憲二, 大島俊之, 佐藤京, 渡邊一悟：北海道におけるBridge Management System(BMS)の現状と今後, 土木学会第58回年次学術講演会, I-446, pp.891-892, 2003.
- 20) 佐藤弘史, 荻原勝也, 二川英夫：橋梁マネジメントシステムの開発に関する調査研究報告書, 土木研究所資料第3633号, 1999.

- 21) 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.
- 22) 杉本博之, 赤泊和幸, 渡邊忠明: BMS への GA の応用と最適戦略に関する基礎的考察, 土木学会第 58 回年次学術講演会, I-A448, pp.895-896, 2003.
- 23) 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.
- 24) 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, 1988.
- 25) 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.
- 26) 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.
- 27) 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.
- 28) 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.
- 29) 大島俊之, 三上修一, 丹波郁恵, 佐々木聡, 池田憲二: 橋梁各部材の資産的評価と橋梁健全度指数の解析, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp.53-65, 2002.
- 30) Makoto Sato, Shuichi Mikami, Ikue Tanba, Kenji Ikeda and Toshiyuki Oshima: On Remaining Asset Values and Maintenance Necessity Level (MNL) of Bridges, Colloquium on Bridge Vibration'03, pp.173-180, 2003.
- 31) 岩渕直, 大島俊之, 三上修一, 山崎智之, 安江哲, 竹田俊明: ACM 型腐食センサによる I 桁橋主桁の腐食環境に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 60 号, pp.254-257, 2004.
- 32) 武山泰, 嶋田洋一, 福田正: マルコフ連鎖モデルによるアスファルト舗装の破損評価システム, 土木学会論文集, No.420/V-13, pp.135-141, 1990.
- 33) 貝戸清之, 阿部允, 藤野陽三: 実測データに基づく構造物の劣化予測, 土木学会論文集, No.744/IV-61, pp.29-38, 2003.
- 34) Thompson, P.D., Small, E.P., Johnson, N. and Marshall, A.R.: The AASHTO Ware Pontis Bridge Management System, *Technical Report*, Caltrans, 1999.
- 35) Shepard, R.W. and Johnson, M.B.: California Bridge Health Index, *Technical Report*, Caltrans, 1999.
- 36) 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.
- 37) AASHTO: *PONTIS User's Manual*, Release 4.0, 2002.
- 38) 土木学会コンクリート委員会: 2001 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編], 制定資料, 2001.
- 39) 阿部頼政: 舗装管理システムに関する研究の動向, 土木学会論文集, No.372, pp.17-27, 1986.

(2004 年 9 月 17 日受付)