

タイトル	ある地方自治体の橋梁の確率的最適維持管理計画に関する研究
著者	齋藤, 善之; 澁谷, 直隆; 杉本, 博之; SAITO, Yoshiyuki; SHIBUYA, Naotaka; SUGIMOTO, Hiroyuki
引用	北海学園大学工学部研究報告(39): 11-44
発行日	2012-01-14

ある地方自治体の橋梁の 確率的最適維持管理計画に関する研究

齋藤善之*・澁谷直隆**・杉本博之***

A Study on Probabilistic Optimum Bridge Management Plan of a Local Autonomy

Yoshiyuki SAITO*, Naotaka SHIBUYA** and Hiroyuki SUGIMOTO***

Abstract

This study focuses on the probabilistic optimization method of bridge management system of a local autonomy. In many conventional cases, the plan involved in the BMS has been handled with a deterministic approach using the LCC as the objective and the year of repair for each member as design variables. However, this formulation involves many combinations of design variables, and does not increase the number of bridges for which effective design solutions can be obtained. While the authors used this formulation, effective solutions were obtained for only around ten bridges at most. From such a viewpoint, the conventional formulation of occasional repairs is not considered practical. In this study, another formulation was made using the inspection intervals of each bridge and the degree of soundness of members to be repaired as design variables.

1. まえがき

現在、各種橋梁の維持管理に関する研究が進められているが、一方で、市町村を含め多くの地方公共団体で、橋梁の中長期的な維持管理のための長寿命化計画の策定が行われている。これらの基本的な考え方は、ライフサイクルコスト（以下LCCとする）最小であり、定式化は種々ありうるが基本的に最適化の問題となる。最適化手法は、構造設計を中心に、国内においても半世紀近い実績がある。構造設計であれば、設計問題の大小に関係なく、有効性を発揮す

* 千歳市（当時北海学園大学） City of Chitose

** 北海学園大学大学院工学研究科建設工学専攻

Graduate School of Engineering (Civil and Environmental Engineering), Hokkai-Gakuen University

*** 北海学園大学工学部社会環境工学科

Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University

ることは可能である¹⁾。しかし、一つの地方公共団体が管理する橋梁の維持管理計画問題では、定式化は可能であっても、実際に解ける橋梁数が少なければ実務上は意味がない。本研究はある地方自治体の橋梁を例としているが、全体では5000以上の橋梁があり、各地方部局ごとに検討するにしても最低200から300橋の橋梁数に対応できる手法でなければ、実務には展開できないことになる²⁾。

以上を研究背景として、本研究は、LCC最小化を目的関数とする橋梁維持管理計画の最適化を研究対象とする。そのためには、最適化問題の解析法とそれに係わる定式化の他に、いくつかの課題がある。それは、劣化曲線と補修費算定のモデル（コストモデル）である。

ある地方自治体の建設部（以下、建設部と略する）の場合、点検は各部材の複数の損傷要因ごとに5段階（1が最悪で5が無損傷）³⁾で評価され、それらの中の最悪値が1部材の健全度となる。部材が複数ある場合は、さらにそれらの最悪値が対象部材の評価値となる。複数径間の場合、他の径間が良い評価であっても、1径間でも悪い評価があればそれが主桁の評価となり、補修費の計算において実際とはかけ離れた値になる可能性がある。そのため、本研究では、主桁、床版等の各部材ごとに複数の値があれば、それらの平均値をとることにしている。また、点検結果にかなりのばらつきがあり、それを1本の劣化曲線で代表させる方法は、LCC等の計算において実態とはかけ離れた値を出力する可能性があるので、複数の劣化曲線を用いて確率論的な扱いをするLCC最適化を試みる。

補修コストは、損傷要因が異なれば計算式も異なるが、本研究では、建設部でLCCの計算に実際に用いられている計算式⁴⁾を用いる。つまり、点検から得られる健全度に応じて、各部材ごとに損傷を想定し、それに対する補修費として計算される値を用いる。特定の損傷に関しては精度が良いコストモデルは提案されている⁵⁾が、実務的には健全度は部材に集約されることと、特定の部材の精度が高くても全体の精度が保証される必要があること等から、実務に使われている計算式を使うことにした。もちろん各損傷ごとの研究が進みすべてにわたって同程度の精度でコストモデルが構築されれば、本研究のコストモデルをそれらに切り替えることは容易である。

最適化の手法は、すべての工学の問題に適用可能なわけではなく、対象とする設計問題の質あるいは量の問題から適用できない場合はある。橋梁維持管理計画に適用が難しかったのは正に量の問題であり、計算時間の問題あるいは確率的に扱う場合には組み合わせ数の爆発という問題があったためである。最適化の手続きそのものにはほとんど時間は要しなく、維持管理計画の問題であれば、大部分がLCCの計算時間である。本研究では、設計変数を点検間隔と補修レベルにした。その結果、最適化を行う前にすべての組合せの計算を行いデータベースとして準備することにより、最適化の過程で要求されるLCCの計算時間は実質的に0とすることができた。これにより多数の橋梁を含む維持管理計画の問題を容易に解くことができ、実務レベル

への展開が可能になった。このデータベースの作成は、1回の計算で最適解が出るのなら必ずしも必要はない。しかし、橋梁維持管理の問題には遺伝的アルゴリズム（以下GAとする）等の手法を使う必要がある。一つの最適化問題に対してパラメータを種々替えて計算し、解の最適性を検討する必要がある。その時、時間のかかる同一のLCC計算を何度もすることを避けることができるので、事前にデータベースとして準備しておく効果は大きい。

設計変数は、従来補修時期とされることが多かったが、点検が行われて初めて損傷が発見され補修が行われること、および地方公共団体によっては、コスト削減のためにできるだけ点検間隔を広くしたいという希望があることを考えれば、点検間隔を設計変数とする方がより実務的といえる。

最適化の計算に際しては、劣化曲線を各部材ごとに1本の曲線で代表される場合（これを確定論的とする）と、前記のように実際の点検のばらつきを考慮してそれぞれ生起確率を有する複数の劣化曲線を用いる場合（これを確率論的とする）の2ケースを試み、一般に確定論的な考え方で計算され、公開されているLCC等の妥当性についての考察を加えている。

次に、国内外の既往の研究について簡単にレビューを試みる。

国内においては、近田ら⁶⁾が204橋を対象に、劣化予測が確定的に与えられた場合を想定して年度ごとに発生する費用の均等化を考慮したGAによる最適化を試みている。古田ら⁷⁾はコンクリート橋10橋を対象に、橋脚は鉄筋残存率、桁は塗装の耐用年数といったように部材ごとに異なる劣化モデルを用いて補修工法および補修間隔を設計変数としたGAによる最適化を行っている。宮田ら⁸⁾は5橋を対象とし、塩害の力学的モデルを用いた劣化予測を行い、各橋において各設計の解析結果の比較によって最適な補修工法を求めた後、橋梁群全体で予算制約を満足するような補修の優先順位を求めている。喜多ら⁸⁾は5橋を対象に、ナッシュ交渉解を援用することにより、補修の前倒しを行い、予算制約を満足しながら各橋梁および橋梁群全体の両方の視点における利得が最大となる手法を提案している。伊藤ら⁹⁾は、桁の支点部と中間部のそれぞれで塗装の劣化調査を行うことで各々の劣化モデルを作成しており、従来の17年周期で全体を塗装するより、桁支点部を17年周期、全体を25年周期で塗装した方がLCCを低く抑えることができるという結果を得ている。

以上の論文はいずれも劣化の過程を確定的に扱っているものである。一方、竹田ら¹⁰⁾は不確実性を考慮した統計的劣化予測手法であるマルコフ過程による劣化予測において、点検間隔の異なる点検データを用いて遷移確率を算出する手法を提案している。佐藤ら¹¹⁾は1橋を対象にマルコフモデルを用いた劣化予測を行い、LCCと純現在価値の両方の視点から、床版と梁それぞれの最適な維持管理シナリオを検討している。マルコフ過程による劣化モデルは、得られた点検データを劣化予測の初期値としてそのまま用いることが出来るという利点があるが、遷移確率を算出するための点検データの蓄積が十分ではない場合が少なくない。そこで貝戸ら¹²⁾

は、データが不足する初期は専門技術者の経験情報等を活用し目視点検データに基づくマルコフ劣化ハザードモデルの推定を行い、今後のデータの追加によって劣化モデルを更新し、その精度を高めていく手法を提案している。マルコフモデル以外にも、松島ら¹³⁾は塩害にさらされるコンクリート構造物を対象に、調査データから求めた塩害における各因子のばらつきを考慮し、腐食減量やひび割れ幅を確率的に予測している。それを複数の補修時期に対して解析を行い、比較することで最適な補修時期を求めている。小幡¹⁴⁾は6橋を対象として、耐力および荷重が正規分布に従うと仮定した信頼性理論によって鋼材腐食による断面欠損を予測し、包絡分析法 (DEA) によってユーザーコストを考慮した補修順位の決定を行っている。

国外においては、Frangopolら¹⁵⁾は20世紀のBMSをレビューし、21世紀には信頼性理論を取り入れることにより最適なBMSを構築できると主張している。Kongら¹⁶⁾は、補修と損傷費用の現価を目的関数として複数のシナリオを設定し、補修間隔を目的関数とし、得られた結果より最適なシナリオの選択を試みている。マルコフ過程を劣化の評価に用いてBMSの最適化を試みている研究は多数ある¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾。ただ、マルコフ過程は橋梁群全体の劣化の推移には有効な手法であるが、本研究のように個々の橋梁の個々の部材の劣化の推移を求めそれによる補修費を計算する場合には、年度の進行に従い組み合わせ数が爆発し、数理計画法による最適化の計算には応用が難しいと思われる。Miyamotoら²⁰⁾は、個々のコンクリート橋を対象とし、補修コストと性能を目的関数とする多目的最適化の問題にGAを応用している。文献21) はテキサス州のBMSに関して総括をしたものである。多くのことに関して記述されているが、GAを含むいくつかの最適化に関して17ページを割き言及している。

以上のように最適化を含むBMSの研究は多数発表されており、不確実性を考慮したBMSに関する研究の発表も少なくない。しかし、本研究のように、点検結果のばらつきを考慮する劣化曲線を用いて個々の部材の劣化と補修コストを考慮し、さらに最適化手法に新しい概念を導入して数値計算を実務レベルで適用可能とし、LCCの最適化を試みた研究は、筆者らの調べた範囲では見られなかった。

以下、本論文では2. でまず建設部の橋梁点検の概要を説明する。次にそれらの点検結果から、部材ごとの劣化曲線の誘導と、それぞれの生起確率を有する複数の劣化曲線の誘導について説明する。3. では、従来の最適化問題の定式化 (定式化1) について説明される。4. で、本研究で用いている最適化問題の定式化 (定式化2) について説明され、確率論的最適化において、1橋の維持補修のシミュレーションを関わるパラメーターのすべての組み合わせに対してそれぞれ独立に行い、その和事象として多数の橋梁群の最適化ができる過程が説明される。5. では10橋の最適維持管理計画問題が解かれ、6. では300橋を例にとり、確定論的に扱う場合と確率論的に扱う場合のLCCの差について考察が加えられる。また、恣意的に点検結果のばらつきを縮小した場合の効果について検証、考察される。さらに、7. では建設部内の

$$r(t) = 1 \quad (t > T) \quad (1b)$$

ここで、 $r(t)$ は供用年数 t における健全度、 T は耐用年数、 f は形状係数を表す。健全度は部材の健全の程度を表す指標であり、5が最も健全な状態、1が最も劣化した状態を表す。耐用年数は供用開始から健全度1になるまでの供用年数を表す値であり、その値が大きくなるほど劣化の進行が遅いことを表す。供用年数 t が耐用年数 T より大きくなれば、式(1b)に示すように健全度は1となる。また形状係数 f は劣化曲線の形状を決定するパラメータであるが、本研究では文献²³⁾を参考に $f=2$ を用いた。また、橋種(鋼橋あるいはコンクリート橋)および部材ごとに劣化の進行は異なると考えられる。そこで、劣化曲線は橋種および部材ごとに作成し、式(1a)中の耐用年数 T の値によって、劣化進行の違いを表すものとする。図-1に劣化曲線概要図を示す。図中では青色の線が耐用年数30年、桃色の線が耐用年数50年、緑色の線が耐用年数70年の劣化曲線を示している。

2.2 点検結果を1本の劣化曲線で表す場合

点検結果を1本の曲線で表す劣化モデルは、劣化曲線による健全度の予測値と点検結果の健全度との2乗誤差を最小化することにより作成する。なお点検結果は健全度によって階級分けし、各階級において健全度および供用年数の平均値を算出して劣化曲線の作成に用いる。点検結果から作成される劣化曲線の例として、1巡目点検における鋼橋の主桁の劣化曲線を図-2に、コンクリート橋の橋面工の劣化曲線を図-3にそれぞれ示す。図-2および図-3では、縦軸は健全度、横軸は供用年数を表す。図中の赤色の点は点検結果を、青色の曲線は点検結果から作成される劣化曲線を表す。パラメータは式(1a)中の耐用年数 T であり、 T がとる値は整数値とする。なお劣化曲線の作成において、平均値をとってもなお健全度5の点検結果は外している。これらのデータも本来は取り入れるべきであるが、点検開始年度以前の補修記録

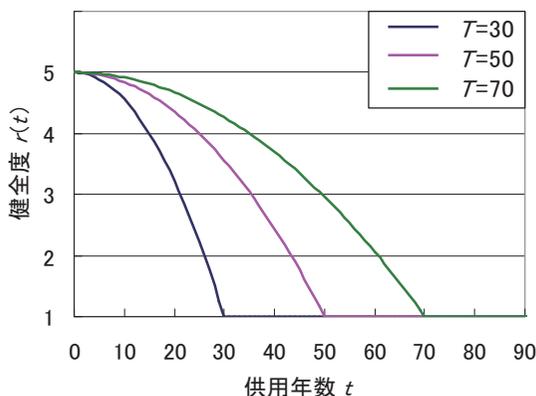
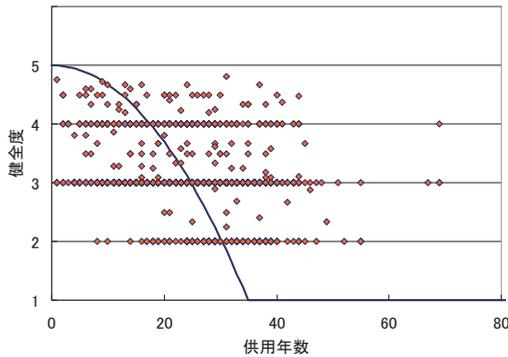
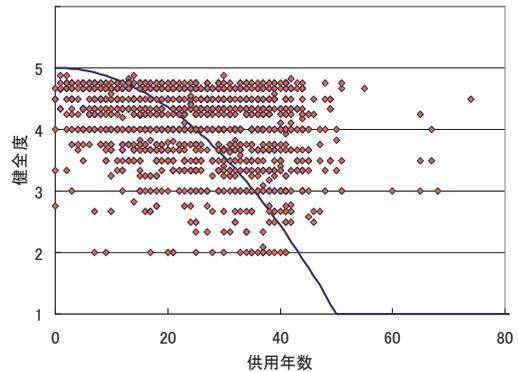


図-1 劣化曲線の概要



図一 2 1 巡目点検における鋼橋 主桁の点検結果と劣化曲線



図一 3 1 巡目点検におけるコンクリート橋 橋面工の点検結果と劣化曲線

表一 2 1 本の曲線で表す劣化モデルにおける耐用年数 (T)

部材	床版		主桁		躯体		伸縮装置		支承		橋面工	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
1 巡目	35	39	36	35	32	34	35	32	41	44	45	50
2 巡目	39	45	39	40	39	40	33	34	44	49	48	54
道	36	39	36	40	32							

が残っており、5 と評価されたいくつかの橋梁を実地に観察した場合、多くの橋梁が明らかに記録に残らない補修が施されていたためである。

得られた1 巡目点検および2 巡目点検の1 本の曲線で表す劣化モデルにおける耐用年数 T を表一 2 に示す。表中の最下数値は、建設部が作成した劣化曲線における耐用年数の値である³⁾。なお、伸縮装置、支承、橋面工に関しては劣化曲線を作成しておらず、また躯体では鋼橋、コンクリート橋の区別をせずに劣化曲線を作成している。本研究で算出した耐用年数 T の値はいずれの部材においても30～55年程度であり建設部が算出した耐用年数とは大きくは異なる結果となった。また、鋼橋の伸縮装置以外の全ての部材において1 巡目点検から2 巡目点検にかけて耐用年数の値が大きくなる結果となった。

2.3 点検結果を生起確率を有する複数の劣化曲線で表す場合

2.2で述べた1 本の曲線で表す劣化モデルの作成では、点検結果を用いてただ1 本の劣化曲線を作成した。しかし、実際の点検結果をプロットした図一 2 および図一 3 を見ると点検結果には大きなばらつきが存在することが確認できる。前述したように一般的な劣化曲線による予測は、前項で述べた1 本の曲線で表す劣化モデルを用いることによって一意的に予測を行う。ところが、1 本の劣化曲線によってただ一通りの劣化予測を行ったとしても、実際の点検結果との間に大きなずれが生じる可能性が考えられる (6.2の計算例で説明される)。実際、図一 2

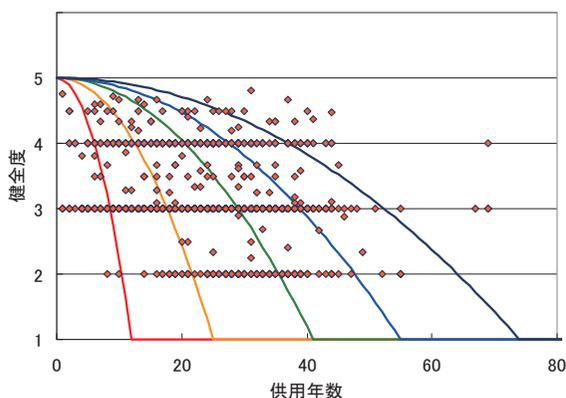


図-4 劣化曲線群と劣化進行のばらつき

および図-3に示した1本の劣化曲線では、点検結果の多様なばらつきを再現できていないため、点検結果の中には予測値との間に大きなずれが生じるデータも存在する。

そこで、本研究では点検結果のばらつきを考慮するための劣化モデルとして、図-4に示すような各々が生起確率を有する複数の曲線から構成される劣化曲線群を作成し、劣化予測に用いることとした。これは、一般的に取られている方法の一つと考えられるが、別に各損傷要因ごとに時間的な経過を観察し損傷曲線を求めるという考え方もありうる。しかし、点検が始まってまだ短期間であり、橋梁を構成するすべての部材に関して損傷レベルの履歴を構築するには質、量ともに十分なデータの蓄積はまだないと考えられるので、前記のような方法を採用した。劣化曲線群は健全度と供用年数からなる2次元空間を劣化曲線群を構成する曲線の数に等しい数の領域に分割し、分割されたそれぞれの領域においてその領域の点検結果を代表する劣化曲線を求めることにより作成する。1本で表す劣化曲線が点検結果全体を代表する曲線であるのに対し、劣化曲線群を構成する曲線は分割された領域内の点検結果を代表する劣化曲線であり、これらの劣化曲線が点検結果の分布全体にわたって配置されるため、劣化曲線群を用いることによって点検結果の幅広い分布を再現した劣化予測が期待できる。

劣化曲線群を作成するに当たり、劣化曲線群を構成する劣化曲線の数 K および各劣化曲線の生起確率 P_k ($k=1\sim K$)を任意に決定する。ただし、各劣化曲線の生起確率 P_k は式(2)を満たすよう決定するものとする。

$$\sum_{k=1}^K P_k = 1 \quad (2)$$

次に、健全度と供用年数からなる2次元空間上にプロットした点検結果を $(K-1)$ 本の分割曲線によって K 個に分割する。このとき、供用年数が若い領域から順に領域1、領域2、…、領域 K と呼ぶこととする。図-5に $K=5$ とした場合の領域の分割例を示す。図中の色つきの点は各領域に属する点検結果を表し、4本の破線は分割曲線を表す。分割曲線には式(1a)

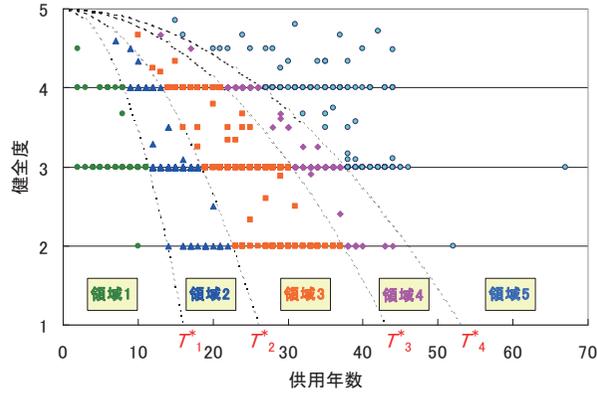


図-5 劣化曲線群の領域決定

によって表される曲線式を用い、それぞれの分割曲線の耐用年数に相当する値を T^*_1 , T^*_2 , \dots , T^*_{K-1} とする。このとき、点検結果の供用年数を t とすると、領域 k ($k=1 \sim K$)に属する点検結果の健全度 y の範囲は式(3a), (3b), (3c)で表される。

$$y \leq r_1(t) \quad (k=1) \quad (3a)$$

$$r_{k-1}(t) < y \leq r_k(t) \quad (k=2 \sim K-1) \quad (3b)$$

$$r_{k-1}(t) \leq y \quad (k=K) \quad (3c)$$

ここで、 $r_k(t)$ は耐用年数 T^*_k の劣化曲線式から算定される供用年数 t における健全度を表す。式(3a), (3b), (3c)によって各領域に属する点検結果の数をカウントし、領域 k に属する点検結果数の全点検結果数に対する割合 R_k を式(4)を用いて算出する。

$$R_k = \frac{n_k}{\sum_{j=1}^K n_j} \quad (k=1 \sim K) \quad (4)$$

ここで、 n_k は領域 k に属する点検結果数を表す。算出した R_k の値が設定した生起確率 P_k に等しくなるよう、分割曲線の耐用年数に相当する値 T^*_1 , T^*_2 , \dots , T^*_{K-1} を決定し、領域 k ($k=1 \sim K$)を決定する。

領域が決定した後、1本の曲線で表す劣化モデルの作成と同様に、健全度の予測値と領域内の点検結果の健全度との2乗誤差を最小化することによって領域 k ($k=1 \sim K$)を代表する劣化曲線を作成する。以降では、領域 k を代表する劣化曲線を曲線 k と呼ぶ。これらの操作によって、劣化曲線群を構成する曲線 k ($k=1 \sim K$)が作成される。

本研究では、1巡目および2巡目点検結果を用いて、 $K=5$ すなわち5本の劣化曲線からなる劣化曲線群を作成した。また、 $P_1=10\%$, $P_2=20\%$, $P_3=40\%$, $P_4=20\%$, $P_5=10\%$ とし、曲

線3を中心として左右対象となるよう各曲線の生起確率を設定した。作成した劣化曲線群について、例として主桁の1巡目点検に対応する劣化曲線群と2巡目点検に対応する劣化曲線群の比較を図-6 ((a) ~ (l)) に示す。

ここで、曲線1あるいは5は特異値としてははずすことも検討されたが、得られているデータはすべて客観的な事実であり、これらを外す科学的な根拠はなく、逆に恣意的な判断が入る可

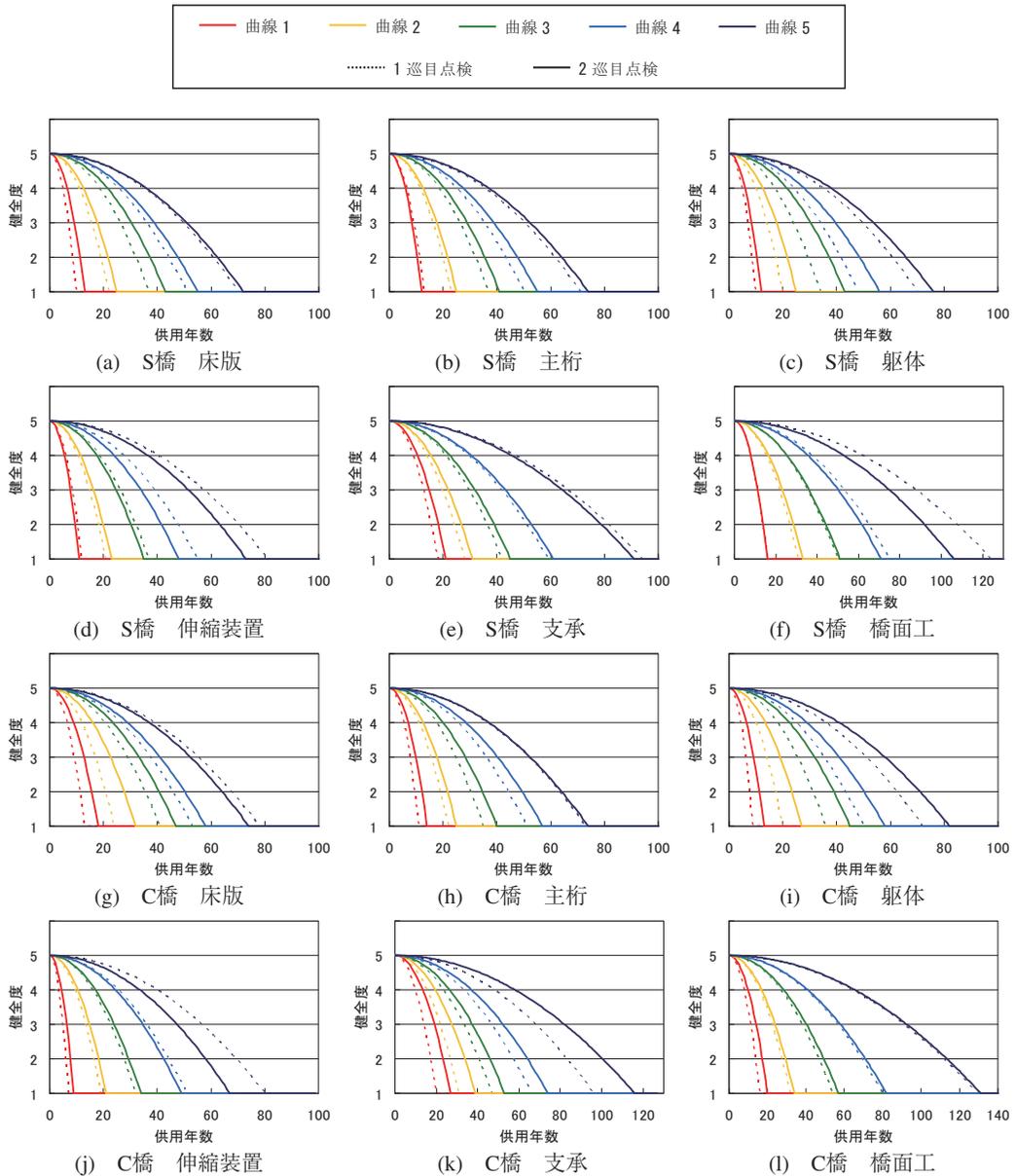


図-6 1巡目点検と2巡目点検の劣化曲線群の比較

能性があるので、これらは外さず以下の計算に用いる。後記の6.3においてばらつきが解消されたと仮定した場合の検討を加えているので、そこで曲線1, 5を外した効果を類推することができる。なお、上記の外れ値については、今後できる限り現地に行き観察し、外すことが妥当と判断されるデータは外す予定である。

図-6では、最も左側の線が曲線1, 左から2本目の線が曲線2, 真ん中の線が曲線3, 右から2番目の線が曲線4, 最も右側の線が曲線5を表しており、破線が1巡目点検, 実線が2巡目点検の曲線を表している。作成した劣化曲線群では曲線1~4については、どちらの橋種においても1巡目点検と2巡目点検では大きな変化は見られなかった。また1本の曲線で表す劣化モデルの場合と同様に、1巡目点検と比較して2巡目点検の劣化曲線の耐用年数が伸びる傾向が見られる。特に曲線1では鋼橋の主桁, 伸縮装置, 橋面工以外の部材は全て耐用年数が2~7年伸びている。曲線1の生起確率は $P_1 = 10\%$ と5本の劣化曲線の中では最も低いだが、曲線1はかなり早い劣化進行を表す曲線であるので、この劣化曲線に対応するLCCは大きな値となる。そのため耐用年数の増減が微小であっても算出する期待値には大きな影響を与えると考えられる。これについては、6. で検証される。

3. 最適維持管理計画問題の定式化1

従来の最適維持管理計画問題では、LCCまたはその期待値を目的関数とし、各部材に対して補修を実施する年度を設計変数とする定式化が多く見られた⁶⁾⁷⁾。前記のようにこの定式化を定式化1と呼ぶ。本研究ではまず、2. で述べた1本の曲線で表される劣化モデルおよび劣化曲線群を用いて、確定論的および確率論的な維持管理計画の策定を試みた。以下、その概要について説明する²²⁾²⁴⁾。

3.1 1本の曲線で表される劣化モデルを用いる確定論的問題

以下に目的関数, 制約条件, および設計変数を示す。

目的関数：

$$OBJ = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{y=1}^{NY} C_{iy} \rightarrow \min \quad (5)$$

制約条件：

$$g(y) = \sum_{i=1}^{NB} C_{iy} - B_y \leq 0 \quad (y = 1 \sim NY) \quad (6)$$

$$g(NY+i) = 2 - R_i^{\min} \leq 0 \quad (i = 1 \sim NB) \quad (7)$$

設計変数：補修年度

$$v_{ijf} \quad (i = 1 \sim NB, j = 1 \sim NM, f = 1 \sim NF) \quad (8)$$

ここで、 OBJ は目的関数、 NB は対象となる橋梁数、 NY はライフサイクル期間、 C_{iy} は橋梁 i において y 年度に発生する総費用、 $g(y)$ は y 年度における予算の制約条件、 B_y は y 年度における年度予算、 $g(NY+i)$ は橋梁 i における健全度に関する制約条件、 R_i^{\min} は11年目以降のライフサイクル期間における橋梁 i の全部材中での健全度の最小値、 v_{ijf} は橋梁 i 部材 j に対して f 回目の補修を行う年度、 NF はライフサイクル期間内での1部材の最大補修回数を表す。

部材の健全度の制約を11年目以降としたのは、本研究で対象としている実橋梁群の中には、初期状態で健全度が2を下回っている部材が複数存在するためである。計画開始時に既に劣化している部材がある状態で、計画1年目から健全度が2以下にならないよう制約を行うと、当然設計解は得られないことから、これらの部材に対して補修をおこなうための健全度制約を課さない猶予期間を設ける必要がある。また、初期状態において既に劣化している部材に対する補修は計画の初期に集中して行われるため、補修費の総和は必然的に予算制約を満たさなくなり、最適解が得られなくなる現象が見られた。そこで本研究では、健全度制約の猶予期間を10年と設定し、その期間内は管理上の限界保全レベルに抑えた補修を行い、かつその期間中の予算設定を高い値に設定することで、計画初期において補修費が予算規模を超えて高額になることを抑制した²⁷⁾。つまり、最初の10年間は以下のような処置を行った。通常の補修を行った場合には部材の健全度は5まで回復するが、初期10年間に行う補修に関しては、補修時の健全度が2以上3未満であった場合には補修後の健全度は4になり、また補修時の健全度が2未満であった場合には補修後の健全度は3になるものとしている。この場合の補修費は、健全度を5まで回復させるために要する補修費²²⁾の40%と仮定した。この40%には明確な根拠はなくあくまでも仮定値である。ただ、古い橋梁を管理している自治体では、BMSの初期の段階では、必要な補修費を確保できない場合が多く、段階的に補修を行って予防保全のプロセスに移行する必要がある。実務的には行われている処置であるが、数値的なデータは公表されていないので、想定値として設定している。

橋梁維持管理の初期の扱いについては、7. でさらに考察を加える。

橋梁 i において y 年度に発生する総費用 C_{iy} は式(9)から算定される。

$$C_{iy} = \sum_{j=1}^{NM} c_{ij}^R + c_{ij}^E \quad (i = 1 \sim NB, y = 1 \sim NY) \quad (9)$$

ここで、 c_{ij}^R は y 年度に発生する橋梁 i 部材 j に対する補修費用⁴⁾、 c_{ij}^E は y 年度に発生する橋梁 i の点検費用²⁴⁾、 NM は部材数($NM = 6$)を表す。

設計変数は各々 $1 \sim NY$ の候補値を持ち、1橋梁の1部材に対してライフサイクル期間内で

行う最大補修回数 NF を設定し、10進数でコーディングしている²²⁾。よって最適化問題における設計変数の総数は $NB \times NM \times NF$ となる。

3.2 劣化曲線群を用いる確率論的問題

定式化1における点検結果のばらつきを考慮した最適維持管理計画の策定では、2. で示した劣化曲線群を用いたシミュレーション計算によって期待値等を算出し、各設計を評価する。

以下に目的関数、制約条件、および設計変数を示す。

目的関数：

$$OBJ = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{NB} \sum_{y=1}^{NY} C_{niy} \rightarrow \min \quad (10)$$

制約条件：

$$g(y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{NB} C_{niy} - B_y \leq 0 \quad (y = 1 \sim NY) \quad (11)$$

$$g(NY+i) = P_i^{max} - P_a \leq 0 \quad (i = 1 \sim NB) \quad (12)$$

設計変数：補修年度

$$v_{ijf} \quad (i = 1 \sim NB, j = 1 \sim NM, f = 1 \sim NF) \quad (13)$$

ここで、 OBJ は目的関数、 N はシミュレーションにおける総試行回数、 NB は対象となる橋梁数、 NY はライフサイクル期間、 C_{niy} は n 回目の試行において y 年度に発生する橋梁 i の総費用、 $g(y)$ は y 年度における予算の制約条件、 B_y は y 年度における年度予算、 $g(NY+i)$ は橋梁 i における健全度に関する制約条件、 P_i^{max} は11年目以降のライフサイクル期間において健全度が2を下回る確率の橋梁 i における全部材中の最大値、 P_a は部材健全度が2を下回る最大の確率の制約値、 v_{ijf} は橋梁 i 部材 j に対して f 回目の補修を行う年度、 NF はライフサイクル期間内で1部材あたりに行う最大の補修回数を表す。

n 回目の試行において y 年度に発生する橋梁 i の総費用 C_{niy} は式 (14) から算定される。

$$C_{niy} = \left(\sum_{j=1}^{NM} C_{nij}^R + C_{nij}^E \right) \quad (i = 1 \sim NB, y = 1 \sim NY) \quad (14)$$

ここで、 C_{nij}^R は n 回目の試行において y 年度に発生する橋梁 i 、部材 j の補修費用⁴⁾、 C_{nij}^E は n 回目の試行において y 年度に発生する橋梁 i の点検費用²⁴⁾、 NM は部材数 ($NM = 6$) を表す。

設計変数は確定論的問題と同様に、それぞれが1～ NY の候補値を持ち、1橋梁の1部材に対してライフサイクル期間内で行う最大の補修回数 NF を設定し、10進数でコーディングを行

っている²²⁾。

また計画の初期10年においては、確定論的問題の場合と同様、健全度制約の猶予期間とし、管理上の限界保全レベルに抑えた補修を行うこととしている。

1つの設計に対する1回のシミュレーションでは、各橋梁、各部材において対応する劣化曲線群の複数の劣化曲線の中から、生起確率 P_k ($k=1\sim K$)に従ってランダムに劣化曲線を決定しLCCを算出する。ここで、 K は劣化曲線群を構成する劣化曲線の本数である。このシミュレーションを総試行回数 N 回繰り返すことによって、目的関数値および制約条件値を算出し、設計の評価を行う。よって、この定式化1における確率論的問題を解くためには、多くの解析が必要となるため、最適解を得るにはかなりの計算時間を要する。本研究では最適化手法に遺伝的アルゴリズム²⁵⁾ (以下、GA)を用いたが、5.で後述する計算結果では10橋の最適化において計10億回 (=人口サイズ500×総試行回数1000回×最終世代数2000)の解析を行い、最適解を得るまでに50時間を要した。

さらに、定式化1で問題となるのが設計変数の組み合わせ数である。後述する計算結果では、ライフサイクル期間 $NY=50$ 年、最大補修回数 $NF=10$ 回としており、この問題における設計変数の組み合わせ数は1部材あたりで ${}_{NY}C_{NF} \doteq 1.027 \times 10^{10}$ 通り、1橋梁あたりで $({}_{NY}C_{NF})^{NM} = (1.027 \times 10^{10})^6 \doteq 1.175 \times 10^{60}$ 通りと膨大な数となる。対象とする橋梁を増やすと、設計変数の組み合わせ数は1橋梁あたりの組み合わせ数の累乗で増加していくため、設計空間の爆発が生じる。そのため、最適化の対象となる橋梁数は多くは出来なく、本研究で試した結果では10橋程度が限界であると思われる。

また、実務における維持管理では、随時に補修が入るわけではなく、定期的な点検の結果を受けて補修を行う対象となる橋梁、および部材を決定するのが一般的であるので、部材ごとの補修時期を設計変数とする定式化1は実務的ではないと思われる。

4. 最適維持管理計画問題の定式化2

3.で述べたように定式化1では、1橋梁当りの設計変数の組み合わせが多くなるため、対象橋梁数を多くは出来なく、また部材ごとに随時補修が行われる設定がなされているのが問題であった。そこで、本研究では設計変数を定期点検を行う間隔年 (以下、点検間隔) および各橋梁の補修実施の判断基準となる健全度 (以下、補修レベル) とした定式化を試みた。以下ではこの定式化を定式化2と呼ぶ。

定式化2のように設計変数を設定することによって、1橋梁当りの設計変数の組み合わせ数が定式化1に比べて激減することから対象橋梁数を大幅に増やすことができる。後述する計算結果では、補修レベルの候補値を4通り、点検間隔の候補値を8通りとしているため、1橋梁当りの設計変数の組み合わせ数は32通りとなり、定式化1の 1.175×10^{60} 通りに比べて大幅に減

っている。そのため、定式化1では対象橋梁数が10橋程度が限界であったのに対し、定式化2では対象橋梁を300橋とした最適化を行うことができた。定式化2について、以下に概要を述べる。

4.1 1本の曲線で表される劣化モデルを用いる確定論的問題

以下に目的関数、制約条件、および設計変数を示す。

目的関数：

$$OBJ = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{y=1}^{NY} C_{iy} \rightarrow \min \quad (15)$$

制約条件：

$$g(y) = \sum_{i=1}^{NB} C_{iy} - B_y \leq 0 \quad (y = 1 \sim NY) \quad (16)$$

$$g(NY+i) = 2 - R_i^{\min} \leq 0 \quad (i = 1 \sim NB) \quad (17)$$

$$\text{設計変数：補修レベル} \quad h_i \quad (i = 1 \sim NB) \quad (18)$$

$$\text{点検間隔} \quad s_i \quad (i = 1 \sim NB) \quad (19)$$

ここで、 OBJ は目的関数、 NB は対象となる橋梁数、 NY はライフサイクル期間、 C_{iy} は橋梁*i*において*y*年度に発生する総費用、 $g(y)$ は*y*年度における予算の制約条件、 B_y は*y*年度における年度予算、 $g(NY+i)$ は橋梁*i*における健全度に関する制約条件、 R_i^{\min} は11日目以降のライフサイクル期間における橋梁*i*の健全度の最小値、 h_i は橋梁*i*における補修レベル、 s_i は橋梁*i*の点検間隔を表す。

橋梁*i*において*y*年度に発生する総費用 C_{iy} は式 (20) から算定される。

$$C_{iy} = \sum_{j=1}^{NM} c_{ij}^R + c_{iy}^E \quad (i = 1 \sim NB, y = 1 \sim NY) \quad (20)$$

ここで、 C_{ij}^R は*y*年度に発生する橋梁*i*部材*j*に対する補修費用⁴⁾、 C_{iy}^E は*y*年度に発生する橋梁*i*の点検費用²⁴⁾、 NM は部材数 ($NM = 6$) を表す。

また、計画の初期10年は、定式化1と同様に健全度制約の猶予期間とし、管理上の限界保全レベルに抑えた補修を行う。

設計変数については、補修レベル h_i は離散型の実数値、点検間隔 s_i は整数値とする。ライフ

サイクル期間内において、各橋梁ごとに点検間隔 s_i の間隔で全部材の点検を行い、健全度が補修レベル h_i 以下となった部材に対し点検年度の翌年に補修を行う。これは、実際の補修が点検の翌年以後に行われるためであり、補修費も点検の1年後に発生するものとした。

4.2 劣化曲線群を用いる確率論的問題

定式化2における点検結果のばらつきを考慮した最適維持管理計画の策定では、全ての劣化曲線の組み合わせのもとでLCCを算出し、劣化曲線の組み合わせの生起確率を掛けることによって期待値等を算出し、各設計を評価する。

以下に目的関数、制約条件、および設計変数を示す。

目的関数：

$$OBJ = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{y=1}^{NY} C_{iy} \rightarrow \min \quad (21)$$

制約条件：

$$g(y) = \sum_{i=1}^{NB} C_{iy} - B_y \leq 0 \quad (y = 1 \sim NY) \quad (22)$$

$$g(NY+i) = P_i^{\max} - P_a \leq 0 \quad (i = 1 \sim NB) \quad (23)$$

$$\text{設計変数：補修レベル} \quad h_i \quad (i = 1 \sim NB) \quad (24)$$

$$\text{点検間隔} \quad s_i \quad (i = 1 \sim NB) \quad (25)$$

ここで、 OBJ は目的関数、 NB は対象となる橋梁数、 NY はライフサイクル期間、 C_{iy} は橋梁 i において y 年度に発生する総費用の期待値、 $g(y)$ は y 年度における予算の制約条件、 B_y は y 年度における年度予算、 $g(NY+i)$ は橋梁 i における健全度に関する制約条件、 P_i^{\max} は橋梁 i の11年目以降の期間において健全度が2を下回る確率の最大値、 P_a は部材健全度が2を下回る最大確率の制約値、 h_i は橋梁 i における補修レベル、 s_i は橋梁 i の点検間隔を表す。

橋梁 i における y 年度に発生する総費用の期待値 C_{iy} は式(26)から算定される。

$$C_{iy} = \sum_{n=1}^N P_n^* \left(\sum_{j=1}^{NM} c_{nij}^R + c_{nij}^E \right) \quad (i = 1 \sim NB, y = 1 \sim NY) \quad (26)$$

ここで、 N は劣化曲線の全組み合わせ数であり、本研究では5本の劣化曲線からなる劣化曲線群を用いていることから $N = 5^6 = 15625$ となる。また、 P_n^* は n 番目の劣化曲線の組み合わせの

生起確率, c_{nij}^R は n 回目の試行において y 年度に発生する橋梁 i 部材 j に対する補修費用⁴⁾, c_{nij}^E は n 回目の試行において y 年度に発生する橋梁 i の点検費用²⁴⁾, NM は部材数 ($NM = 6$) を表す.

n 番目の劣化曲線の組み合わせの生起確率 P_n^* は式 (27) から算定される.

$$P_n^* = \prod_{j=1}^{NM} P_{m_{nj}} \quad (n = 1 \sim N) \quad (27)$$

ここで, m_{nj} は n 番目の劣化曲線の組み合わせにおいて部材 j に対して劣化曲線群の中から用いる劣化曲線の番号, $P_{m_{nj}}$ は部材 j の劣化曲線群における曲線番号 m_{nj} の生起確率を表す.

また計画の初期10年では, 確定論的問題と同様, 健全度制約の猶予期間とし, 管理上の限界保全レベルに抑えた補修を行う.

設計変数については確定論的問題と同様に, 補修レベル h_i は離散型実数値, 点検間隔 s_i は整数値とし, 補修の実行および補修費の発生は点検の1年後としている.

4.3 各橋梁の和事象としての最適化問題と事前計算の蓄積の利用

補修の優先順位等によって補修の有無を決定するような維持管理計画策定問題では, 橋梁間に相関があることから, 橋梁群全体の総補修費の真の期待値を得るためには全ての橋梁における劣化曲線の全ての組み合わせを考える必要がある. しかし, 定式化2における補修は点検時の健全度が補修レベル h_i 以下であるかどうかのみによって決定し, 他の橋梁, 部材の補修の有無や健全度状態は無関係であることから, 定式化2において算出する個々の橋梁のLCCの期待値は橋梁間で独立した値である. 確率変数の和の期待値は各々の確率変数の期待値の和で表されることから, 全橋梁分の総費用の期待値は式 (28) から得られる.

$$E(C_{all}) = \sum_i^{NB} E(C_i) \quad (28)$$

ここで, NB は対象となる橋梁数, C_{all} は全橋梁分の総費用, $E(C_{all})$ はその期待値, および C_i は橋梁 i の総費用, $E(C_i)$ はその期待値を表す. よって橋梁群全体の総補修費の期待値は, 近似的な値ではなく, 真の期待値が個々の橋梁のLCCの期待値を足し合わせるにより得られる.

また, 前述したように定式化2における1橋梁あたりの設計変数の組み合わせ数は定式化1と比較して非常に少ない. そこで, 本研究では1橋梁ごとに設計変数と劣化曲線の全ての組み合わせの下で事前に解析を行い, それらの結果をデータベースとして蓄積することとした. その結果, 最適化の際にはデータベースを参照することのみでよく, 最適化過程における解析に要する時間はほとんど0となり, 定式化1と比較して最適解を得るまでに要する時間の大幅な短縮が期待できる. なお, 2. で示した5本の曲線からなる劣化曲線群を用いる場合, 全ての

劣化曲線の組み合わせ数は $N = 5^6 = 15625$ 通りとなるため、後述の計算におけるデータベース作成の際には橋梁ごとに（劣化曲線の組み合わせ数） \times （設計変数の組み合わせ数） $= 15625 \times 32 = 50$ 万回の解析を行うこととなる。

5. 10橋による定式化1と定式化2の比較

上述したように、最適維持管理計画策定問題の定式化を定式化1から定式化2に変更することにより、最適解を得るまでの時間短縮および設定問題の現実との整合を図った。そこで、ここでは定式化1および定式化2において確率論的問題の最適解を比較することにより、定式化変更の効果を確認する。

どちらの定式化においても、対象橋梁数は $NB = 10$ 橋、ライフサイクル期間は $NY = 50$ 年、年度予算は $B_y = 1$ 億円（1橋当たり1000万円）（ $y = 1 \sim NY$ ）とした。また、健全度の制約条件である P_a の値は5%、10%、12%、15%、20%とした最適化をそれぞれ試みたが、 P_a を5%および10%とした場合には年度予算をどのように設定しても最適解を得ることはできなかった。これについては補修工事の分割方法などの設定次第で改善可能であるとは考えられるが、それは今後の課題として、ここでは $P_a = 12\%$ として最適化を行った結果について示す。対象とする10橋の供用年数、橋種、及び計画開始時の健全度等のデータを表-3に示した。表中における橋梁6の床版の健全度の値が「-」となっているのは、橋梁6が中空床版橋であり、主桁と一体として健全度評価が行われるためである。

また、定式化1について、ライフサイクル期間内の1部材に対する最大補修回数を $NF = 10$ 回とし、1線列に対する総試行回数を $N = 1000$ 回とし、定式化2については、補修レベル h_i の候補値を2.5、3.0、3.5、4.0の4通り、点検間隔 s_i の候補値を4年、5年、6年、7年、8

表-3 対象橋梁10橋のデータ

橋梁	供用年数	橋種	計画開始時の健全度					
			床版	主桁	躯体	伸縮装置	支承	橋面工
1	23	C	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.67
2	46	S	2.00	3.00	2.50	2.00	3.67	4.67
3	48	S	2.67	5.00	2.00	5.00	4.11	2.00
4	19	S	3.00	4.00	3.00	4.00	3.22	3.08
5	27	S	5.00	3.00	3.00	2.00	3.00	3.67
6	28	C	-	2.00	5.00	2.00	5.00	2.75
7	35	S	3.00	3.00	4.00	3.50	4.17	3.50
8	21	C	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.67
9	35	C	2.00	3.00	5.00	5.00	5.00	4.75
10	45	C	2.00	3.00	2.00	3.50	5.00	3.67

年、9年、10年、11年の8通りとした。また、点検結果のばらつきを考慮するための劣化モデルとして、2巡目点検に対応する劣化曲線群を用いている。最適化手法にはGA²⁵⁾を用い、GAのパラメータは交叉確率を80%、突然変異確率を5%、交叉時の切断箇所数を30、最大大変異回数²⁶⁾を20回とし、定式化1では人口サイズを500、定式化2では人口サイズを1000としている。なお、GAの終了条件は定式化1では世代数が2000に達するか、500世代にわたって最適解の更新が行われない場合、定式化2では世代数が20000に達するか、2000世代にわたって最適解の更新が行われない場合に計算を終了することとした。

最適化を行った結果、定式化1の最終世代数は2000、定式化2の最終世代数は2130であった。各定式化の最適化における収束過程を図-7および図-8にそれぞれ示す。また、最適化によって得られた維持管理計画における総費用期待値の年度推移および部材健全度の平均期待値の推移について、定式化1による場合を図-9に、定式化2による場合を図-10にそれぞれ示す。図-9、図-10では横軸が計画開始からの年度、左の縦軸および棒グラフが各年度の総費用期待値、右の縦軸および紫色以外の折れ線が各部材の健全度期待値の全橋における平均値、紫色の折れ線が各年度における健全度期待値の全橋・部材中の最小値を表している。

定式化1の最適維持管理計画における総費用期待値は2億8791万円となった。この値は最適

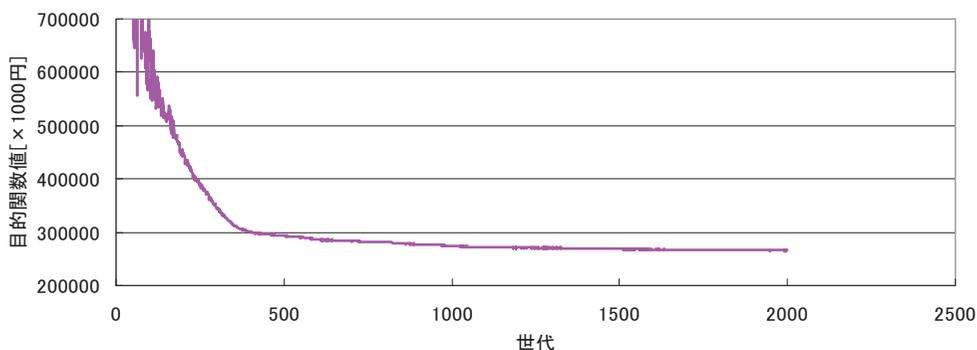


図-7 定式化1の最適化における目的関数値の収束過程

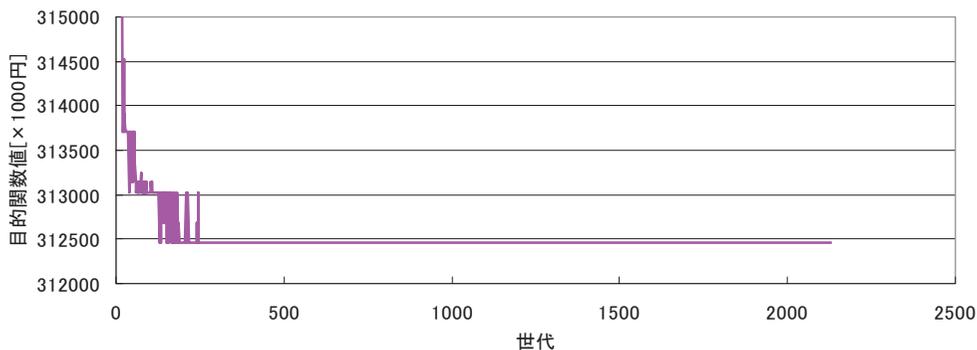


図-8 定式化2の最適化における目的関数値の収束過程

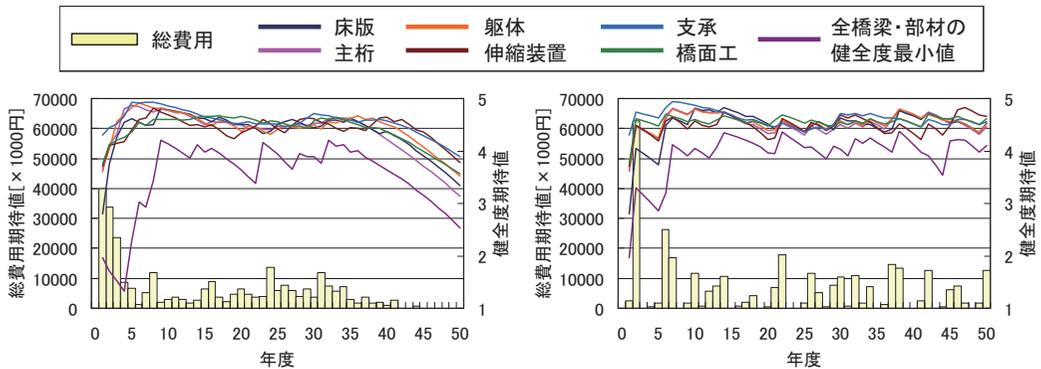


図-9 定式化1における総費用期待値と健全度期待値の年度推移(10橋)

図-10 定式化2における総費用期待値と健全度期待値の年度推移(10橋)

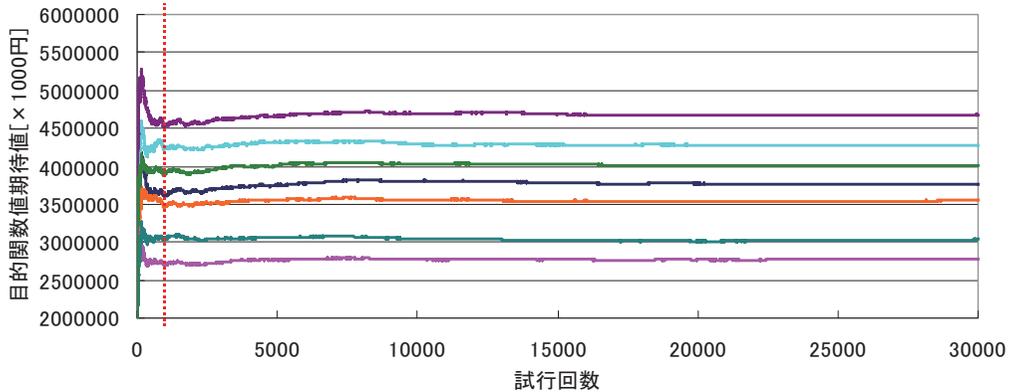


図-11 7種類のランダムシードによる総費用期待値と試行回数の関係

化によって得られた設計解を用いて、最適化後に再度解析を行うことによって得た値であるが、図-7に示すように最適化段階で算定された値(2億6535万円)とは異なっている。これは、1000回の試行において乱数によってそれぞれ異なる劣化曲線の組み合わせが適用されているためである。このように総費用期待値が解析ごとにばらつくのは、試行回数が少ないことが原因である。図-11にランダムに作成した7種類の設計においてそれぞれ30000回の解析を行った際の期待値の推移を示す。なお、図中の赤の破線は試行回数1000回を示している。図を見ると、試行回数1000回付近では期待値は未だ振動しており、信頼できる期待値を得るためには25000回以上の試行が必要であることが分かる。

一方、定式化2の最適維持管理計画における総費用期待値は3億1246万円と定式化1の2億8791万円と比較して8.5%上昇する結果となった。これは定式化1では補修年度そのものを決めることができ、実務的かどうかは別として、設計の自由度が高いためである。しかし、実際には同じ橋梁内の部材に対する補修はある程度まとめて行うことが多いことを考えると、部材ごとに補修を行う年度を決定している定式化1は実務的とは言えないのは既に述べた通りであ

る。その点、定式化2では該当する部材をまとめて補修ようになっており、また点検結果を受けて補修の有無を決定している現状を考えると、定式化2は現実に即した定式化であると言える。

総費用期待値および各部材の平均健全度期待値の推移に着目すると、定式化1ではライフサイクル終盤では補修を行っておらず、結果として健全度が低下している。この定式化では、制約条件さえ満足していれば補修は行わない方がコストは少なくなるので、よく見られる傾向ではあるが、維持管理はライフサイクル期間中のみ行われるものではなく、以降も継続して行われていくことを考えると、終盤に補修が行われずに健全度が低下する傾向は好ましくない。定式化2では、補修のルールがライフサイクル期間中で一貫しているため、終盤においても補修が行われているので、健全度の低下は見られない。

定式化1における最適化は結果を得るまでに50時間を要した。これは、3. で述べた通り最適解を得るまでに計10億回もの解析を行っていることによるものである。対して、定式化2ではデータベースの作成に20分程度、最適化に1分程度で結果を得ることができており、定式化1に比べて非常に短い時間で最適解を得ることができた。

6. 300橋による計算結果と考察

ここでは、定式化2における維持管理計画策定問題において、対象橋梁数を $NB = 300$ 橋、ライフサイクル期間を $NY = 50$ 年とし、種々の劣化モデルを適用することにより得られる最適解について比較・考察を行う。いずれの問題でも、設計変数の候補値は、補修レベル h_i で2.5, 3.0, 3.5, 4.0の4通り、点検間隔 s_i で4年, 5年, 6年, 7年, 8年, 9年, 10年, 11年の8通りとした。なお、健全度が2を下回る確率の許容値である P_a の値は、前章で用いた12%では解が得られなかったことから、 P_a の値を15%, 20%, …と順に上げて最適化を行った。ここでは、解が得られた $P_a = 25\%$ の結果について示す。また、最適化手法にはGA²⁵⁾を用い、GAのパラメータは人口サイズを1000, 交叉確率を80%, 突然変異確率を5%, 交叉時の切断箇所数を30, 最大大変異回数²⁶⁾を20回とし、世代数が20000に達するか、2000世代にわたって最適解の更新が行われない場合に計算を終了することとした。なお、300橋の確率論的問題に用いるデータベース作成に要した時間は9時間30分程度であった。

6.1 確定論的問題と確率論的問題の比較

ここでは、1本の劣化曲線で表す劣化モデルを用いた確定論的問題における最適解と劣化曲線群を用いた確率論的問題における最適解について比較を行う。予算の設定は、確定論的問題では式(29)および式(30)、確率論的問題では式(31)および式(32)のように値を設定した。なお、予算の値は初期値を30億円とし、3億円の刻み幅(予算が9億円未満の場合は1億

5千万円の刻み幅) で予算を減らしていき、解が得られる最小の値を採用している。

確定論的問題

$$B_y = 9 \text{ 億円 (1 橋当り300万円)} \quad (y = 1 \sim 10) \quad (29)$$

$$B_y = 3 \text{ 億円 (1 橋当り100万円)} \quad (y = 11 \sim NY) \quad (30)$$

確率論的問題

$$B_y = 15 \text{ 億円 (1 橋当り500万円)} \quad (y = 1 \sim 10) \quad (31)$$

$$B_y = 7 \text{ 億5千万円 (1 橋当り250万円)} \quad (y = 11 \sim NY) \quad (32)$$

ここで、1～10年目の年度予算の値を11年日以降の年度予算よりも高く設定しているのは、3.1で述べたように、計画開始時には既に劣化している部材が多く存在し、健全度に関する制約条件を満たすためには計画初期の段階でそれらの部材に対して補修を行う必要があり、そのためには多く補修費が必要となるためである。よって、健全度制約の猶予期間とした初期10年間は年度予算を高めを設定することで、補修費が予算規模を超えて高額になることを抑制した。なお、1～10年目の年度予算の値は、いずれの問題においても3億円、9億円、15億円、30億円の4種の値で最適化を試み、その中から解が得られる最小の値を採用している。また、11年日以降の年度予算の値は、1～10年目の年度予算の値から1億5千万円間隔で減らして最適化を行っていき、その中で解が得られる最小の値を採用している。

最適化によって得られた維持管理計画における総費用(期待値)および平均健全度(期待値)の年度推移を表した図を、1巡目点検における確定論的問題について図-12に、確率論的問題について図-13に、2巡目点検における確定論的問題について図-14に、確率論的問題について図-15にそれぞれ示す。図-12～図-15の表記方法は基本的に図-9および図-10と同様であるが、年度予算を示す赤色の破線を図に加えている。また、それぞれの図で示す総費用および健全度の値は図-12および図-14では確定値、図-13および図-15では期待値を表している。1巡目点検について、確定論的問題の最適解の総費用は95億6872万円となったのに対し、確率論的問題の最適解の総費用期待値は139億4668万円となり、確定論的問題の総費用に比べて約46%上昇する結果となった。また2巡目点検について、確定論的問題の最適解の総費用は86億9968万円となったのに対し、確率論的問題の最適解の総費用期待値は118億3164万円となり、確定論的問題の総費用に比べて約36%上昇する結果となった。

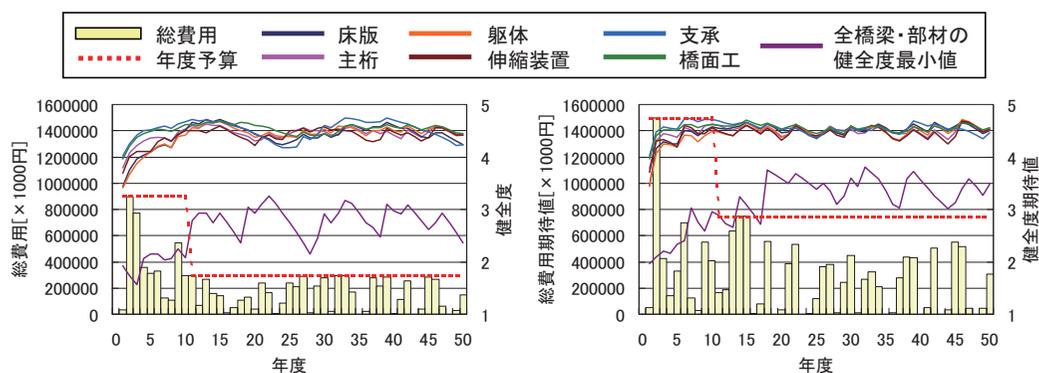


図-12 確定論的問題における総費用と健全度の年度推移（1巡目点検）

図-13 確率論的問題における総費用期待値と健全度期待値の年度推移（1巡目点検）

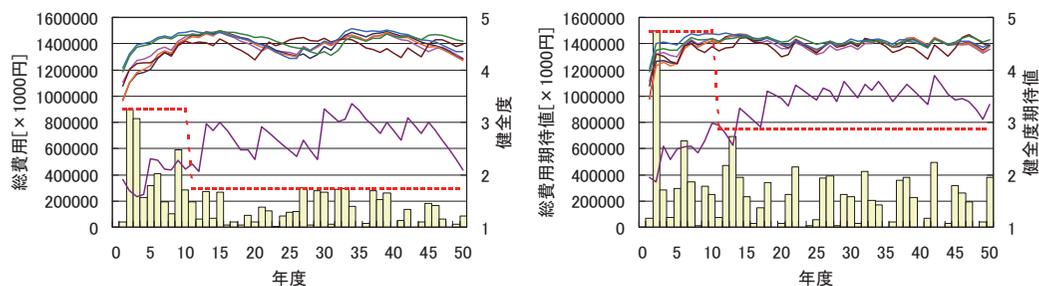


図-14 確定論的問題における総費用と健全度の年度推移（2巡目点検）

図-15 確率論的問題における総費用期待値と健全度期待値の年度推移（2巡目点検）

各年度における総費用（期待値）の推移に着目すると、いずれでも2年目の総費用（期待値）がライフサイクル期間における最高値となっており、特に確率論的問題における2年目の総費用期待値は他の年の総費用期待値に比べ突出して高い値となっている。これは初期状態において既に劣化が進んだ部材を補修するためであるが、確率論的問題では点検結果のばらつきを考慮することから劣化曲線群における曲線1のような劣化進行が早い場合も考えるため、確定論的問題に比べて早期により多くの部材に対して補修を行っている。そのため、確定論的問題では3年目に補修を行うような部材でも、確率論的問題では2年目に補修を行う必要があったために、結果として2年目の総費用期待値が突出する結果となったと考えられる。ここで、1年目の総費用（期待値）が低い値となったのは、4. で述べたように、定式化2では補修が実行され補修費が加算されるのは点検の翌年度であることから、1年目には点検費用しか発生しないためである。

健全度（期待値）の推移について着目すると、健全度（期待値）の平均値は10年目以降であればいずれの部材においても4以上と全体としては健全な状態を保っている。また、図中に紫色の折れ線で示した各年度における健全度（期待値）の全橋梁・部材中の最小値の推移を見ると、確定論的問題よりも確率論的問題の方がより高い値を推移しているのが分かる。これは確

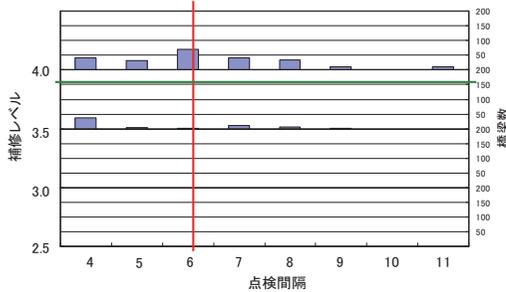


図-16 確定論的問題における設計変数の分布 (1巡目点検)

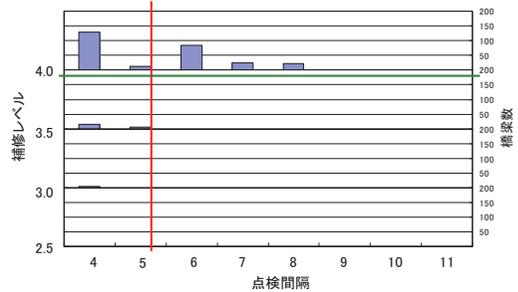


図-17 確率論的問題における設計変数の分布 (1巡目点検)

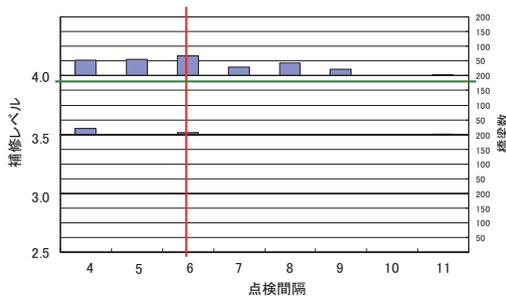


図-18 確定論的問題における設計変数の分布 (2巡目点検)

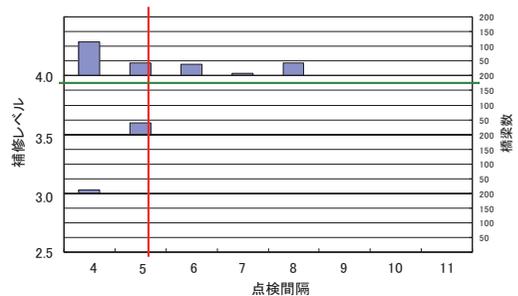


図-19 確率論的問題における設計変数の分布 (2巡目点検)

率論的問題では曲線1, 曲線2のような劣化進行の早い劣化曲線を考慮する必要があることから, 健全度に関する制約条件を満たすためには健全度にはある程度の余裕を持たせる必要があったためである。

1巡目点検の確定論的問題における最適解の設計変数の分布を図-16に, 確率論的問題における最適解の設計変数の分布を図-17に, 2巡目点検の確定論的問題における最適解の設計変数の分布を図-18に, 確率論的問題における最適解の設計変数の分布を図-19にそれぞれ示す。図-16～図-19では横軸に点検間隔, 左の縦軸に補修レベル, 棒グラフおよび右の縦軸は設計変数の組み合わせに該当する橋梁数を示しており, 図中の緑色の線は補修レベルの平均値, 赤色の線は点検間隔の平均値を表している。図を見ると, いずれの最適解においても補修レベル4となる橋梁数が最も多く, 確定論的問題, 確率論的問題のどちらにおいても予防保全が総費用(期待値)を抑制する効果があることを示す結果となった。しかし同じ予防保全であっても, 確率論的問題の最適解における点検間隔は確定論的問題に比べて全体的に短くなっており, より強い予防保全型の計画となっている。これは劣化曲線群の内, 適用する劣化曲線によって劣化が顕在化する時期が異なることから, 短い間隔で点検を行い少しでも早く補修を実施することによって総費用期待値を抑制するためであると考えられる。

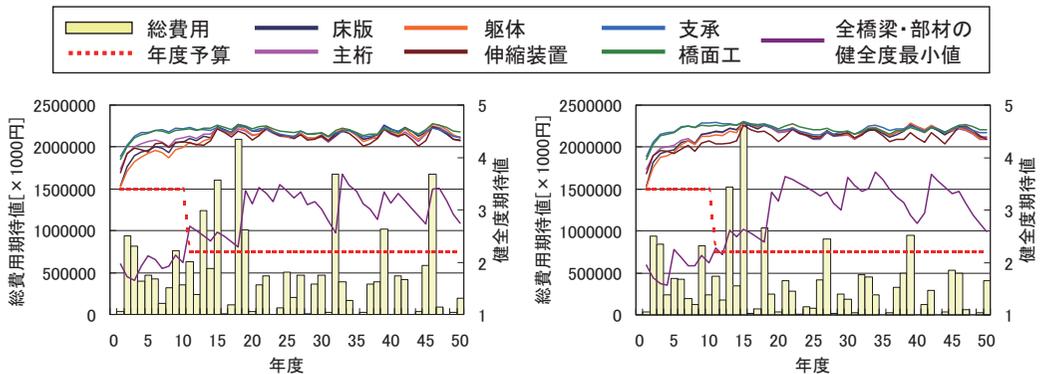


図-20 確定論的問題の最適解に劣化曲線群を適用した結果の総費用期待値と健全度期待値の年度推移（1巡目点検）

図-21 確定論的問題の最適解に劣化曲線群を適用した結果の総費用期待値と健全度期待値の年度推移（2巡目点検）

6.2 確定論的最適解の確率論下での評価

6.1の確定論的問題で得られた最適解は部材ごとに1本の劣化曲線のみを考慮して計算されている。しかし実際は図-6のような複数の劣化曲線に遭遇する可能性がある。そこで、確定論的に得られた設計解が複数の劣化曲線にそのまま対応するとして、LCCなどの計算を試みた。

図-20に1巡目点検、図-21に2巡目点検のそれぞれの結果における総費用期待値および平均健全度期待値の年度推移を示す。図-20および図-21の表記方法は図-13～図-15と同様である。総費用期待値のライフサイクル期間内の総和は、1巡目点検では226億3453万円と元の確定値と比較して約137%増加し、2巡目点検では180億9307万円と元の確定値と比較して約108%増加する結果となり、どちらの場合でも総費用期待値は確定値の2倍以上になる結果となった。これは、劣化進行の早い曲線を考慮するかしないかによる差であると考えられる。確率論的問題における最適解では、劣化進行の早い曲線を考慮したことから健全度に関して余裕を持たせるため、計画の初期に集中して、かつ点検間隔の短い補修を実施しているのに対し、確定論的問題の最適解では1本の劣化曲線しか考えないため、確率論的問題における最適解に比べて点検間隔は長く、計画初期における補修は少ない。そのため補修実施時の健全度がより低い値となり、結果として補修費が高くなったものと考えられる。また、1巡目点検、2巡目点検のいずれにおいても年度予算を超過する年、および健全度が2を下回る確率が許容値を超過する年があり、予算制約および健全度制約を満たさなくなっている。

現状のBMSでは、一本の曲線で表される劣化モデルを用いて劣化予測を行い、維持管理計画を策定するのが主流である。しかし、実際の点検結果には2. で述べたように大きなばらつきがあり、この点検結果を参考にして補修が実施されることから、実務では一本の曲線で表される劣化モデルを用いて算出するような総費用を計上するのは困難であり、点検結果のばらつき

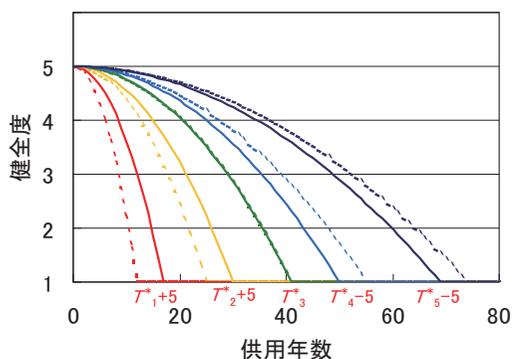


図-22 ばらつきが改善された劣化曲線群の概念図

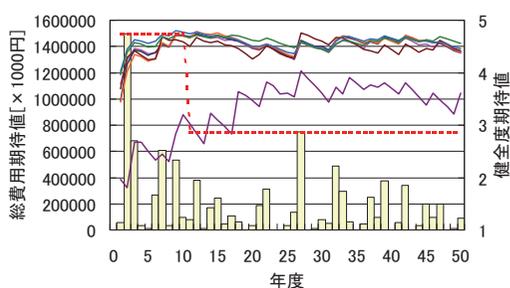


図-23 ばらつきが改善された問題における総費用期待値と健全度期待値の年度推移

きに応じて総費用もばらつくと考えられる。その時、確定論的問題から得た最適解では実際に計上される総費用は最適化において算定した値とかけ離れた値となり、また制約条件も満たさなくなると考えられる。よって、最適維持管理計画を策定するには点検結果のばらつきを考慮することが必要であると考える。

6.3 点検結果を恣意的に改善した場合の最適維持管理計画の比較

点検結果のばらつきには種々の要因が考えられるが、定期点検の積み重ねや技術の向上等により、将来的に点検結果のばらつきは改善されていくと考えられる。そこで、ばらつきが改善した場合を仮想して劣化曲線群を恣意的に作成し、これを用いて確率論的問題を解くことによって、ばらつきが改善した際にLCC期待値に与える影響を確認する。

ばらつきが改善した劣化曲線群は、2巡目点検に対応する劣化曲線群を元に、曲線1, 2の耐用年数を+5年、曲線4, 5の耐用年数を-5年変更することにより作成した。ばらつきが改善した劣化曲線群作成の概念を図-22に示す。図中の T_k^* ($k=1\sim 5$)は2巡目点検に対応する劣化曲線群における曲線 k の耐用年数を表す。図を見ると分かるように、ばらつきが改善した劣化曲線群は5本の劣化曲線群がより中心に集まった劣化曲線群となる。

予算の設定は、比較によってばらつき改善の効果を確認するため、式(33)、式(34)に示すように6.1の確率論的問題と同じ値を設定した。

$$B_y = 15 \text{ 億円 (1 橋当り 500 万円)} \quad (y = 1 \sim 10) \quad (33)$$

$$B_y = 7 \text{ 億 5 千万円 (1 橋当り 250 万円)} \quad (y = 11 \sim NY) \quad (34)$$

最適化によって得られた維持管理計画における総費用期待値の年度推移および平均健全度期待値の推移を図-23に示す。図-23の表記方法は図-13および図-15と同様である。最適解の

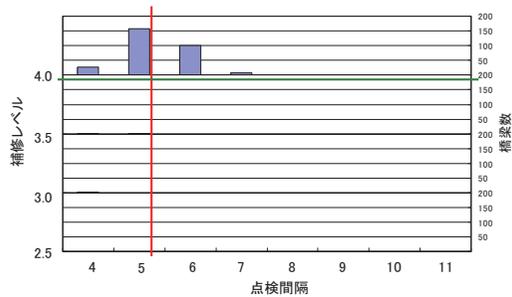


図-24 ばらつきが改善された問題における設計変数の分布

表-4 総費用（期待値）の比較

	1 巡目点検	2 巡目点検	2 巡目点検の ばらつき改善
確定論	95億6872万円	86億9968万円	
確率論	139億4668万円	118億3164万円	91億6587万円

ライフサイクル期間内における総費用期待値は91億6587万円となった。6.1で述べた1巡目点検および2巡目点検における確定論的および確率論的問題から得られた総費用（期待値）との比較を表-4に示す。ばらつきを改善することにより得られた総費用期待値91億6587万円は、2巡目点検に対応する劣化曲線群を用いた確率論的問題の最適解における総費用118億3164万円に比べて、約23%の減少が見られた。これは、曲線1および曲線2の耐用年数の値が5年大きくなっているため劣化進行の速度が緩まり、補修回数が減少、また補修時の健全度が向上したことによるものと考えられる。また、1巡目点検、2巡目点検の確率論的問題における最適解にも見られたように、2年目の総費用期待値が特に高い値となっている。これは初期状態において既に劣化が進んだ部材を補修するためである。

同じく、確定論的最適解との比較を行うと、86億9968万円に対して上記のように91億6587万円となり、5%程度の増加まで差が少なくなった。この結果は、ばらつきの改善により確定論的設計解に近づくことを表している。

得られた最適解における全橋梁の設計変数の分布について図-24に示す。図-24の表記方法は図-16～図-19と同様である。ほとんどの橋梁の補修レベルが4.0となり、予防保全型の計画であるのは2巡目点検に対応する劣化曲線群を用いた確率論的問題の最適解と同様であるが、点検間隔が4年となる橋梁は少なくなっており、相対的に予防保全型の維持管理計画としての特色は弱まっている。これは、1巡目点検または2巡目点検に対応する劣化曲線群を用いた確率論的問題の最適解ほど、計画に余裕を持たせる必要は無く、5年や6年間隔の点検でも充分に対応できるということを示していると考えられる。

このようにばらつきを改善出来れば、維持管理計画において劣化曲線の変動に対応するため

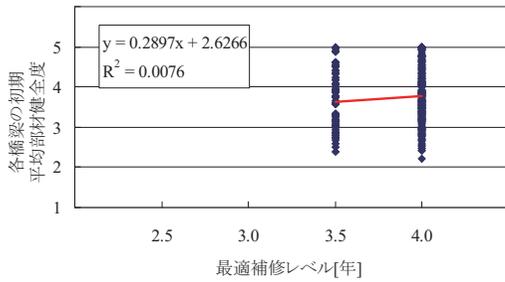


図-25 各橋梁の初期平均部材健全度と最適補修レベルの関係（確定論的問題，1巡目点検）

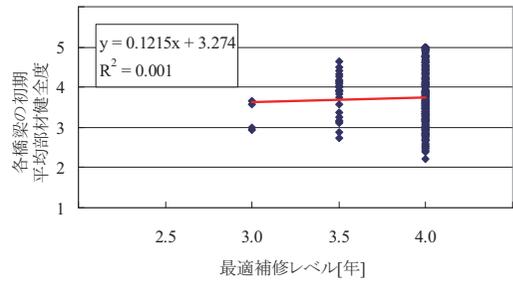


図-26 各橋梁の初期平均部材健全度と最適補修レベルの関係（確率論的問題，1巡目点検）

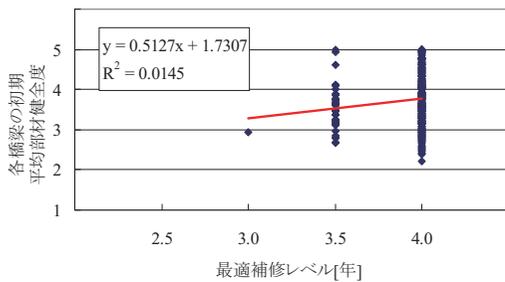


図-27 各橋梁の初期平均部材健全度と最適補修レベルの関係（確定論的問題，2巡目点検）

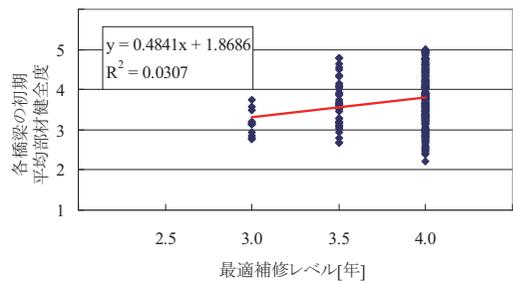


図-28 各橋梁の初期平均部材健全度と最適補修レベルの関係（確率論的問題，2巡目点検）

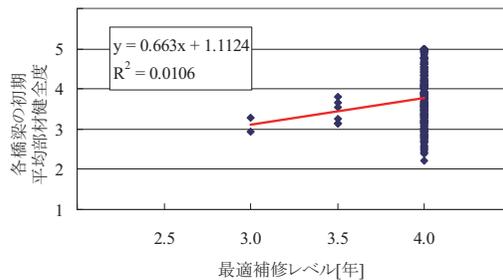
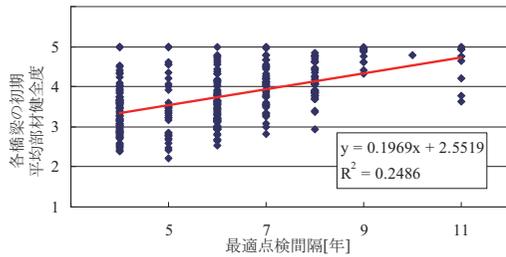


図-29 各橋梁の初期平均部材健全度と最適補修レベルの関係（ばらつき改善）

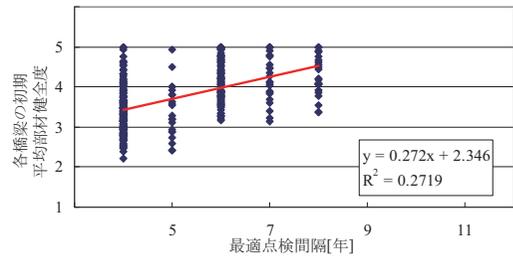
の余裕を小さくすることが出来，また総費用期待値も低くなることから維持管理の問題において非常に有利になると考えられる。

6.4 最適維持管理計画における各橋梁の初期平均部材健全度と最適点検間隔の関係

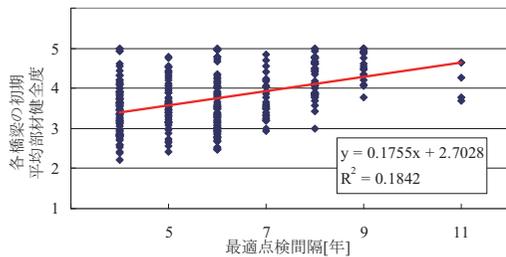
6.1, 6.3で述べた各々の問題における最適維持管理計画では，いずれの問題においても2年目にライフサイクル期間中の最大値となる総費用（期待値）が発生しており，これは初期状態において既に劣化が進んだ部材を補修するためであるのは前述した通りである。このことから，対象とする6～15橋梁の初期状態が最適維持管理計画に与える影響は少なくないと考えら



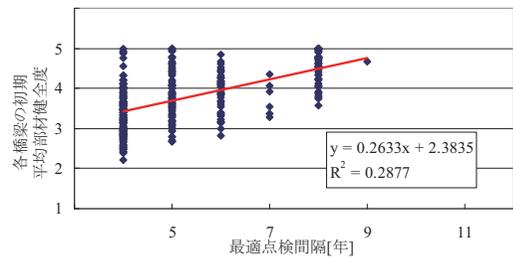
図一30 各橋梁の初期平均部材健全度と最適点検間隔の関係(確定論的問題, 1 巡目点検)



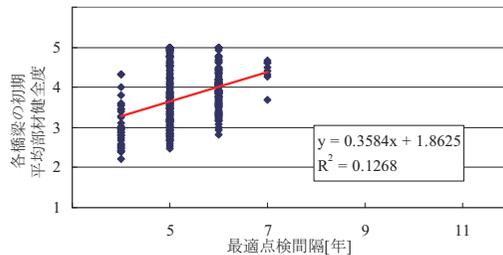
図一31 各橋梁の初期平均部材健全度と最適点検間隔の関係(確率論的問題, 1 巡目点検)



図一32 各橋梁の初期平均部材健全度と最適点検間隔の関係(確定論的問題, 2 巡目点検)



図一33 各橋梁の初期平均部材健全度と最適点検間隔の関係(確率論的問題, 2 巡目点検)



図一34 各橋梁の初期平均部材健全度と最適点検間隔の関係(ばらつき改善)

れる。仮に、橋梁の初期状態と最適維持管理計画との間に何らかの相関が確認できれば、維持管理政策の意思決定における一つの判断材料となりうることから、最適維持管理計画の傾向を確認することは有用である。そこで、橋梁の初期状態と最適維持管理計画の関係を確認するため、横軸を最適補修レベル、縦軸を初期状態における平均部材健全度とし、対象橋梁300橋分のデータをプロットした散布図を図一25～図一29にそれぞれ示す。また同様に、横軸を最適点検間隔、縦軸を初期状態における平均部材健全度とし、対象橋梁300橋分のデータをプロットした散布図を図一30～図一34にそれぞれ示す。なお、図中には近似直線(赤線)と近似直線式、および決定係数(R^2 値)を併記している。得られた近似直線に着目すると、最適補修レベル、最適点検間隔のどちらにおいても近似直線の勾配は正となっている。つまり、今回の結果では決定係数の値が0.001～0.29程度と低いことから参考程度にとどめるべきではあるものの、最適維持管理計画では初期状態の部材健全度が低い橋梁に対して、補修レベルを低くし、

短い間隔で点検を行う傾向が見られた。

7. 初期投資に関する考察

6. で示した計算結果では、いずれの問題においても予防保全的な計画が最適解として得られた。しかし実際には、部材の状態が悪い一部の橋梁に対して集中的に投資せざるを得なく、その間に他の橋梁部材の劣化が進行することから、なかなか予防保全の状態に移行できないのが現実である。その解決策として、6. で示した計算結果のように維持補修計画の初期に投資を集中し、状態の悪い橋梁を出来るだけ早く健全な状態にする方法が考えられる。しかし、やみくもに多目の投資をすればよいわけではなく、やはり中長期的なLCC最小化の中で予算計画を考えるべきである。以上の観点のもとに、ここではLCC最小化のもとで初期の予算計画をどのようにすればよいか検討を加える。

7.1 対象橋梁群モデル

ここでは、建設部内のある地方部局管轄の橋梁のうち、諸元データが揃っている170橋を計算の対象とした。なお、維持補修計画の初期における橋梁群の健全度が初期投資に及ぼす影響を確認するため、実状に基づく健全度分布を持つ標準モデルに加え、健全度の分布を恣意的に操作し、健全度状態を悪化させた「悪化モデル」、健全度状態を良好な状態にした「良好モデル」のそれぞれに対して、最適化を行い比較する。なお、「悪化モデル」および「良好モデル」は「標準モデル」の橋梁諸元はそのままに、全体の40%の橋梁を無作為に抽出し、「悪化モデル」では各部材の健全度を1減、「良好モデル」では各部材の健全度を1増することにより作成した。なお、健全度の最大値は5であり、また健全度が1となるような部材は即時補修が行われることから、「良好モデル」において健全度が5以上となる場合は健全度を5、「悪化モデル」において健全度が2未満となる場合は健全度を2としている。図-35に、「標準モデ

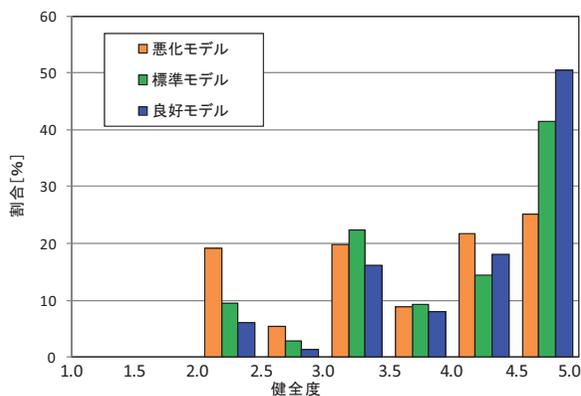


図-35 各橋梁群モデルの部材健全度の分布

ル], 「良好モデル」, 「悪化モデル」のそれぞれの部材健全度の分布を示す. なお, 図-35では6つの橋梁部材を全てひとまとめに集計している.

7.2 予算と総費用の関係

本章では, 前節で説明した3種類の部材健全度分布を有する橋梁群モデルに対して様々な予算制約の下で最適化を行うことにより, 予算と総費用の関係を考察する. なお, 最適設計問題の定式化は4.1で述べた定式化2における確定論的問題のものをを用い, 設計変数の候補値は, 補修レベル h_i で2.5, 3.0, 3.5, 4.0の4通り, 点検間隔 s_i で4年, 5年, 6年, 7年, 8年, 9年, 10年, 11年の8通りとした. 計算は以下のような手順で進めた.

第1段階の計算は, ライフサイクル期間中の予算を一定に設定し行った. 予算平準化の観点からは求められる一つのシナリオである. 図-36に概念図を示すように, 最初はすべての制約条件に対して余裕のある予算設定をし, 徐々に予算を少なくしていき, 最初に何らかの制約条件がアクティブになる点をA点とする. さらに予算を適当な間隔で減らしていき, 今度は, どうしても制約条件を満足せず, 許容設計が得られない最小の予算設定に対応する点をB点とする. 次に得られたAB間を等間隔に分割しそれぞれの予算制約に対する最適化を行い, 結果を図にプロットする. この時, 図-36では総費用が急に増加する点をC点としている. この第1段階の計算では, 計画後期の予算制約はほとんどアクティブにはならず一般にかなり余裕がある. そこで第2段階では, 初期の予算制約に対して後期(11年目以降)の予算制約を許容設計が得られる限界まで少なくする計算を行った. 得られる関係は図-36と同様であるが, 総費用は, 横軸の初期予算制約に対し, 当然初期と後期を同じ予算制約にする場合と比べてかなり上昇することになる.

7.3 計算結果

前節で述べた計算を, 3種類の部材健全度分布を有する橋梁群モデルに対して行うことによ

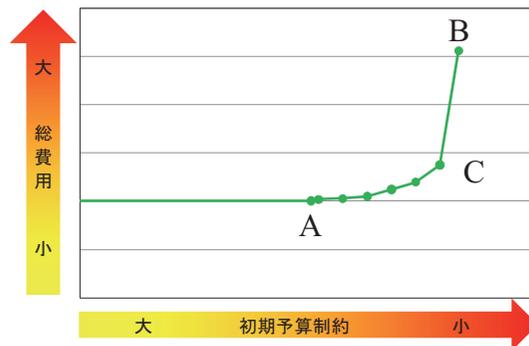


図-36 初期予算制約と総費用の概念図

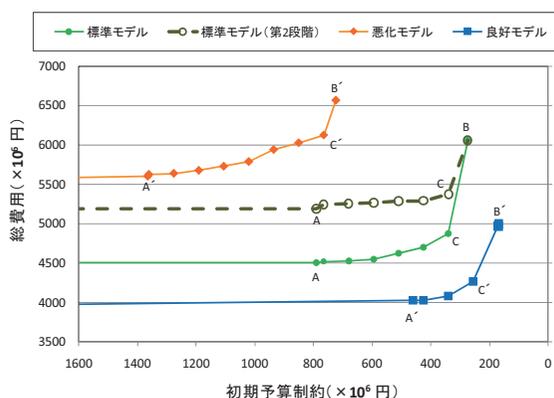


図-37 初期予算制約に対する総費用の推移

り得られた結果を図-37に示す。図では横軸に初期の予算制約値，縦軸に総費用を示し，緑の実線は「標準モデル」，橙の実線は「悪化モデル」，青の実線は「良好モデル」を示す。各モデルに共通して，予算制約値が低くなるにつれ総費用の増加が始まるA点および許容設計が得られる限界となるB点を確認できる。第2段階の計算は「標準モデル」のみ行った（図中破線）が，予算制約が緩い範囲で、5億円強の総費用の増加がある以外は同じ傾向である。いずれの場合も，総費用が急激に増加するC点が存在しており，このことから低すぎる予算設定は総費用の大幅な増大を招くことが確認できる。また，A点，B点，C点のいずれも初期の部材健全度が悪いほど左にシフトしていることから，予算と総費用の関係は初期健全度の状態に大きく左右されると考えられる。これらから初期予算は，得られる総費用に非常に大きく影響し，初期健全度の状態をよく勘案して設定すべき，非常に重要なパラメータであるということが言える。なお，今回は傾向の把握にとどまったが，図-37のC点は汎用化の中で定量化すべきと考えられ，これについては今後の課題とする。

8. まとめ

本研究は，LCC最小化を目指す橋梁の補修計画策定において，実務レベルに应用可能な数の橋梁を対象とできる最適化手法の確立を主な目的としている。最適化問題の定式化においては，補修時期ではなく，実際は点検が行われればから補修計画が策定されることを考慮して，点検間隔（年）と補修レベルを設計変数とし，50年間のライフサイクル期間におけるLCC最小化を目的関数とした。部材の健全度は，各損傷要因から評価される値が対応する部材に集約されるとし，補修コストも，部材に集約された健全度より計算されるとしている。計算においては，各部材ごとに1本の劣化曲線をあてはめる場合と，点検結果のばらつきを考慮し複数の劣化曲線を用いて確率的に扱う場合の検討を行っている。

本研究から得られた事項を箇条書きにすると以下のようになる。

- 1) 定式化2により、最適化問題として設定されるすべてのパラメータの組合せを事前に計算し、データベースを作成することにより、多数の組合せが必要な確率論的な問題においても、少ない計算時間で設計解を得ることができた。
- 2) 確率論的な扱いをすることにより、1本の劣化曲線で代表させて得られるLCCより30～40%程度大きくなることが示された。種々の公共団体では、1本の劣化曲線で代表させて得られる値を公表し今後の維持管理への投資の根拠としている。巨視的にはこれらは間違いではないが、本研究に示されるように値の精度にはいささかの疑問が残るので、今後さらに精度を上げる努力をし、より実情に近い値を公表すべきと考える。
- 3) 点検データのばらつきが少ない状態を恣意的に設定して計算した結果、LCCは減少することが示された。今後、点検の精度はさらに向上される必要があると思われる。
- 4) 最適化計算の結果は、点検間隔は4～6年となり、補修レベルは概ね4.0を示していた。これらは、予防保全を明確に示しており、出来るだけ早く予防保全の体制に移行するために、計画初期には、多めの投資が必要であることが示された。決定係数の値からは、まだ相関性は少ないが、初期健全度によっては点検間隔を長くできる指針などの検討への可能性を示唆している。
- 5) 計画の初期に部材健全度の制約を課さない期間を10年間と設定したが、できるだけ早く予防保全の状態に移行し、予算の平滑化を図る必要があるので、初期状態をできるだけ短くする必要があると思われる。今後、段階的な補修のコスト計算の検討とともにさらに研究が必要と思われる。
- 6) 様々な予算制約の下で最適化を行った結果、低すぎる予算設定は費用の大幅な増加を招くことが示された。また、予算と費用の関係は対象とする橋梁群の初期状態に大きく左右される結果が示された。

参考文献

- 1) 杉本博之：最適化手法と工学問題への適用，日本機械学会第9回最適化シンポジウム（特別講演）資料，2010。
- 2) 杉本博之：維持管理と最適化，電力土木（総説），NO.342，pp. 3－8，2009。
- 3) 北海道建設部：公共施設長寿命化検討委員会報告書，pp.28－31，pp.34－59，2006。
- 4) 北海道建設部：公共施設長寿命化検討委員会報告書，pp.74－86，2006。
- 5) 宮田将門，森田絵里，那須清吾：ライフサイクルコストおよび施工猶予を考慮した橋梁アセットマネジメントシステムの構築，土木計画学講演集，2008。
- 6) 近田康夫，阿曾克司，佐々木貴惟，城戸隆良：年次費用均等化を考慮した既存橋梁群の補修計画支援，構造工学論文集 Vol.54A，pp.134－141，2008。
- 7) 古田均，亀田学広，中原耕一朗：改良型遺伝的アルゴリズムによる複数橋梁の維持管理計画策定システムの実用化，土木学会論文集 A Vol.62 No. 3，pp.656－668，2006。

- 8) 喜多敏春, 近田康夫: 橋梁維持管理計画へのゲーム理論 (ナッシュ交渉解) の適用, 土木学会第65回年次学術講演会, VI-434, 2010.
- 9) 伊藤大輔, 高原剛士, 白柏秀章, 栗林健一, 三宅浩一郎: ライフサイクルコストの最小化を目的とした鋼橋の清掃・塗装周期について, 土木学会第65回年次学術講演会, IV-351, 2010.
- 10) 竹田俊明, 大島俊之, 佐藤誠, 三上修一: 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 構造工学論文集 Vol.51A, 2005.
- 11) 佐藤互, 横田弘: LCCとNPVによる最適維持管理シナリオの評価に関する研究, 土木学会第65回年次学術講演会, VI-435, 2010.
- 12) 貝戸清之, 小林潔司: マルコフ劣化ハザードモデルのベイズ推定, 土木学会論文集 A Vol. 63 No. 2, pp.336-355, 2007.
- 13) 松島学, 田中秀周, 横田優, 中川裕之: 塩害劣化を受けるコンクリート構造物のライフサイクルコストを考慮した最適補修時期, 構造工学論文集 Vol. 53A, pp.156-164, 2007.
- 14) 小幡卓司: 橋梁の損傷度・余寿命およびUCと再建設費用を考慮したBMS構築に関する研究, 土木学会論文集 A Vol. 64 No. 2, pp.488-501, 2008.
- 15) Frangopol, D. M., Kong, J. S. and Gharaibeh, E. S.: Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges, J. of Comput. in Civil Eng., pp.27-34, 2001.
- 16) Kong, J. S. and Frangopol, D. F.: Probabilistic Optimization of Aging Structures Considering Maintenance and Failure Costs, J. of Structural Eng., pp.600-616, 2005.
- 17) Lounis, Z. and Vanier, D.J.: Optimization of bridge maintenance management using Markovian models, Proc. of the Inter. Conf. on Short and Medium Span Bridges, pp.1045-1053, 1998.
- 18) Frangopol, D. M., Kallen, M.J. and Noortwijk, J. M.: Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures, Prog. Struct. Engng Mater, pp.197-212, 2004.
- 19) Bortot, F., Zonta, D. and Zandonini, R.: A Bridge Management Strategy based on Future Reliability and Semi-Markov Deterioration Models, 3rd Inter. ASRANet Colloquium, 2006.
- 20) Miyamoto, A., Kawamura, K. and Nakamura, H.: Bridge management system and maintenance optimization for existing bridges, Computer-Aided Civil and Infrastructure Eng., pp.45-55, 2000.
- 21) Texas Transportation Institute: Asset Management Literature Review and Potential Applications of Simulation, Optimization, and Decision Analysis Techniques for Right-of-Way and Transportation Planning and Programming (pp.61-77), Report No. FHWA/TX-07/0-5534-1, 2007.
- 22) 杉本博之・赤泊和幸・中野大志・渡邊忠朋: 北海道の橋梁の補修費計算モデルの構築と最適維持管理計画について, 応用力学論文集 Vol. 6, pp.1121-1130, 2003.
- 23) Yanev, Bojidar. Bridge Management. John Wiley & Sons., 2007.
- 24) 齋藤善之: 劣化進行の不確実性を考慮した橋梁の最適補修計画に関する研究, 平成21年度北海学園大学大学院修士論文, 2010.
- 25) 杉本博之, 鹿汴麗: 工業最適設計のための汎用GAプログラムについて, 北海学園大学学園論集 第96・97号, pp.81-105, 1998.
- 26) 鹿汴麗, 久保洋, 杉本博之: GAによる複合体の最適材料選択問題に関する研究, 日本機械学会論文集61巻584号A編, pp.805-810, 1995.
- 27) 澁谷直隆, 齋藤善之, 杉本博之: 最適化手法による橋梁長寿命化計画における初期投資に関する一考察, 土木学会第66回年次学術講演会, I-137, pp.273-274, 2011.