

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

Construction of Repair Cost Model and Optimum BMS of the Bridges in Hokkaido

杉本博之*・赤泊和幸**・中野大志**・渡邊忠朋+

Hiroyuki Sugimoto, Kazuyuki Akadomari, Hiroshi Nakano, Tadatomo Watanabe

*工博, 北海学園大学教授, 工学部土木工学科 (〒064-0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目)

**北海学園大学大学院生, 工学研究科建設工学専攻 (〒064-0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目)

+工博, 北武コンサルタント(株)専務 (〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通 7)

The road bridges in Hokkaido had mainly been constructed from 1960's to 1970's. As a result, it is anticipated that the number of the bridges that exceed 50 years after construction is increased rapidly and large maintenance and rehabilitation cost will be required from 2010 to 2020's. On the other hand, it must be accepted that the 60% of public investment will be reduced in twenty years later. In this paper, under such background, reconstruction of the bridge database of Hokkaido is first presented. The repair cost which will be required during 50 years from hence is calculated under several assumptions on the deterioration curves and the used years of each member. Two kinds of numerical examples are shown. In the first numerical example, the deterioration rate of the members of the bridges is given initially. In the second numerical example, GA is applied to optimize the strategy of bridge management.

Key words: database reconstruction, deterioration curve, repair cost, GA

キーワード: データベースの再生, 劣化曲線, 補修費, 遺伝的アルゴリズム

1. まえがき

高度経済成長期に, 社会基盤整備のため多くの土木構造物が造られた。それらの構造物の内いくつかはすでに耐用年数を迎えつつあるし, 10 年後にはその数が急速に増加することはすでに指摘されている。一方で公共事業費に占める公共投資額が削減傾向にある現在では, 多くのインフラを維持していくためのより効率的な維持管理手法の確立が, 必要不可欠の問題として挙げられる。先の兵庫県南部地震において, インフラの破壊が社会に多大な影響を及ぼすことが証明された。また, 最近ではトンネルなどでのコンクリートの剥落等によってあわや大惨事になりかねない事件もおき, 土木構造物全体を通じて早急に維持管理戦略を立てなくてはならない状況にあると考えられる。

橋梁に関しても同様のことが言え, ライフサイクルコスト (以下, LCC) をいかに少なく抑えるかということが重要な課題となる。そのため, 限られた予算を有効に活用する橋梁維持管理システム (以下, BMS) に関する研究が多くなされている。^{1)~6)}

本研究は, 北海道の道々に架かる橋梁の維持管理に関する提言を目的としている。そのためには, 上記のように LCC を計算できるモデルとそのための実橋のデータが必要となる。

しかし, 今全国の地方公共団体で問題になっているように, 現存する橋梁のデータベースは極めて貧弱な状態にあり, かなりのデータが欠損している。そこで, 本研究では, 札幌土木現業所 (以下, 札土) 管轄の橋梁を対象とし, 不足するデータを既存のデータから補充することを試み, その上で補修費計算のモデルを作成した。

次に, 補修は各部材毎にある指定された健全度になったら予算に関係なく実施されるとして, 今後 50 年間に要する橋梁の補修費用の推定を試みた。この場合, もう一つの重要な要因としては劣化曲線がある。この劣化曲線に関しては, いくつかの劣化推移モデルを作成し, その下で計算を行った。

最後に, 橋梁を構成する各部材を, どの年度にどの健全度の時に補修するかという問題を設定し, 予算制約の下で GA を用いて最適化を試み, 今後の橋梁の維持補修に関する基本的な戦略について考察を試みた。

2. 対象橋梁の選定とデータの再生

対象橋梁は札土管轄の橋梁 764 橋の中から, トラス, アーチ橋あるいは極端にデータが不足している橋梁を除いた 227 橋を選んだ。トラス, アーチ橋を除いた理由は, 補修費を計算するのに必要な断面諸元に関するデータがないことと, そ

表-1 対象橋梁の構造形式の分類

橋梁構造形式	橋梁数
単純桁(合成)	119
単純桁(非合成)	27
連続桁(非合成)	18
ポステンT桁	8
プレテンT桁	3
ポステン中空床版	10
プレテン中空床版	42
合計	227橋

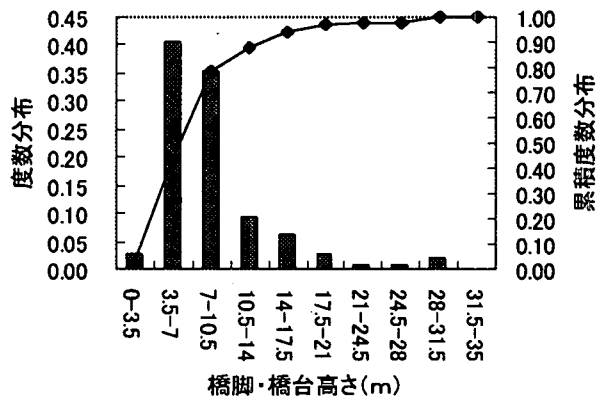


図-1 橋脚・橋台高さの分布

これらの橋梁数が少ないためである。227 橋の内訳を表-1 に示す。表において、ポステンT桁、ポステン中空床版は、ポストテンション方式プレストレストコンクリートT桁、同じく中空床版の略字であり、プレテンT桁、プレテン中空床版は、プレテンション方式プレストレストコンクリートT桁、同じく中空床版の略字である。以降、これらの橋梁形式に対しては表-1 の略字を用いる。表に示した橋梁構造形式の内、補修費の計算モデル作成に必要なデータ（構造形式、主桁、材料、桁形式区分のデータおよび主桁本数、有効幅員、径間数、桁高、橋脚・橋台高さ）が完全に保存されているのは56 橋であった。不足のデータは以下のようにして再生した。

2.1 橋脚・橋台高さ

橋脚・橋台高さが不明な橋梁数は123 あった。図-1 は、札幌土木現業所管轄437 橋の各橋梁の下部構造の高さの平均値の分布を示したものである。不明のデータも、これらと同じ分布をするとして、値を補足した。つまり、右の軸の相対度数分布に対応する値を乱数で発生させ、その値に対応する横軸の橋脚・橋台高さをもって該当の橋梁の下部構造の高さとした。

2.2 主桁高さ

主桁高さが不明な橋梁数は158 であった。ポステンT桁以外は、札幌土木現業所の764 橋の中で桁高のある108 橋の値を元に多変量解析することにより計算式を求め、それらにより主桁高さを計算した。計算式を表-2 に示す。

ポステンT桁に関しては、既存のデータがなかったため、発表されている関係式⁷⁾を用いて計算した。

表-2 桁高の計算式

構造形式	主桁高さの式
単純桁(合成)	$0.0210 \times L/N + 0.0578 \times B - 0.154 \times n + 1.057$
単純桁(非合成)	$0.0477 \times L/N + 0.0128 \times B - 0.0796 \times n + 0.576$
連続桁(非合成)	$0.0203 \times L/N + 0.0890 \times B - 0.104 \times n + 0.686$
ポステンT桁	$0.0512 \times B/N + 0.323$
プレテンT桁	$0.0448 \times L/N + 0.00207 \times B - 0.0239 \times n + 0.473$
ポステン中空床版	$0.0251 \times L/N + 0.0167 \times B - 0.0119$
プレテン中空床版	
L: 橋長, N: 径間数, B: 有効幅員, n: 主桁本数	

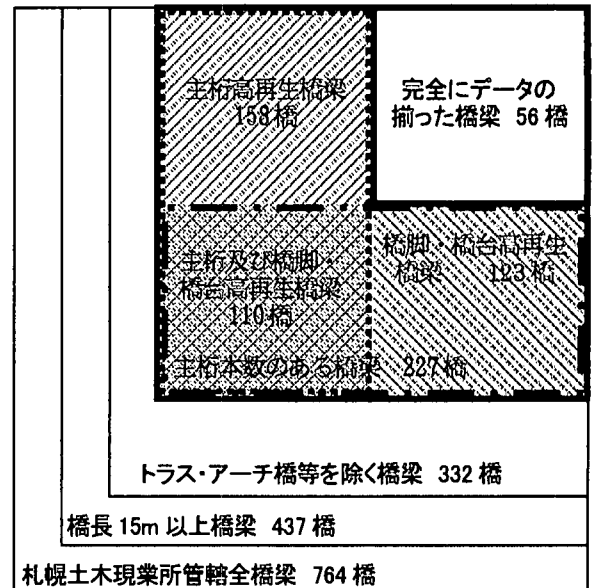


図-2 橋梁数の説明図

これらの橋梁と数の関係を図-2 にベン図を利用して説明した。

3. 部材健全度の経年的推移の考え方

部材の健全度（北海道の点検では劣化度と称されるものであるが、同じ値をここでは健全度と呼ぶことにする）は、1～5 で評価されるものとする。5 は健全、1 は損傷が著しい状態であり、2, 3, 4 はそれぞれそれらの中間の状態である。

なお、本研究では各橋梁が床版、主桁（鋼桁あるいはコンクリート桁）、橋脚、橋台、伸縮装置、支承、橋面工の7つの要素から構成されたと考え、それらを部材と呼んでいる。

ここで、問題は、架設時(健全な状態)からどのような推移を経て部材は劣化していくかという点と、維持補修計画の開始年度には必ずしも全部材が健全な状態ではなく、何年かの使用年数を経ているし、それらは部材により異なる点である。これらに対して、本研究では以下のように対応した。

3.1 劣化曲線

劣化曲線は、部材毎、あるいは立地条件などにより異なることが予想され、その有効な設定のためには多くの実験、実

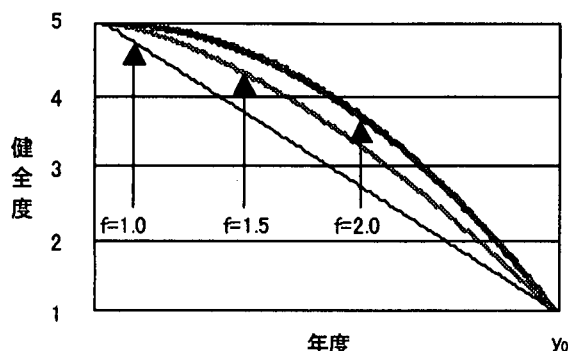


図-3 3種類のfに対する劣化曲線の基本形

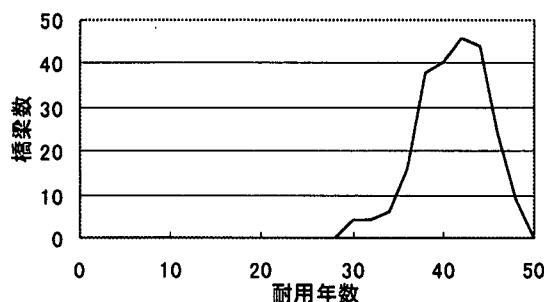


図-4(a) 橋脚の耐用年数の分布

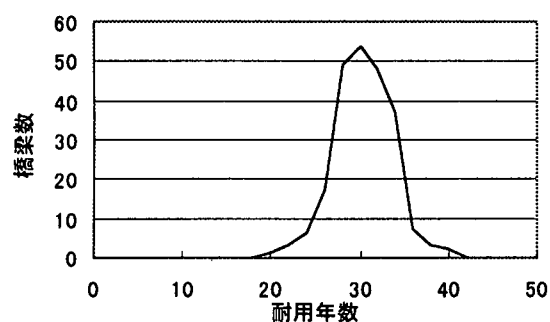


図-4(b) 支承の耐用年数の分布

地観測などの積み重ねが必要と考えられる。⁸⁾

本研究では、図-3に示す曲線を基本形と考え、各橋梁、各部材毎に耐用年数(新規に架設してから健全度が1になるまでの年数)、使用年数(維持補修計画を立てる年度までに経過した年数)を任意に与えて計算を行った。

図の曲線は、次式で得られる。

$$r(y) = -3.5 \left(\frac{y-1}{y_0-2} \right)^f + 5 \quad (1)$$

ここで、 $r(y)$ は架設直後から y 年経過したときの健全度、 y_0 は耐用年数、 y は架設直後からの年数を示している。また f は劣化曲線の形状を示しており、値が大きくなればなる程上に凸になり、 $f=1$ では直線となる(図-3)。後記の計算例では、係数 f には、全橋梁、全部材に同一の値が与えられている。

なお、実際の健全度の値は、式(1)により計算される値の小数点以下を四捨五入し整数化して適用している。

表-3 耐用年数10年の場合の健全度の基本的推移

年度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
健全度	5	5	5	4	4	3	3	2	2	1

表-4 使用年数が3年の場合の健全度の推移

年度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
健全度	4	4	3	3	2	2	1	1	1	1

表-5 補修が5年度に実施された場合の健全度の推移

年度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
健全度	4	4	3	3	2	5	5	5	4	4

△
補修

3.2 耐用年数、使用年数の与え方

劣化曲線は、各橋梁、各部材毎に与えられる。その特性は耐用年数 y_0 に支配される。耐用年数は、基本的には任意に与えるが、例えば、床版と支承が同一の分布では不自然である。そこで、各部材種毎に中心値を与え、その前後10年の間に正規分布的に分布すると仮定して各部材の耐用年数を与えた。各部材の中心値は、床版、鋼桁、伸縮装置、橋面工が20年、コンクリート桁、支承を30年、橋脚、橋台を40年としている。例として、橋脚、支承の227橋の耐用年数の分布を示すと図-4(a)、(b)のようになる。

使用年数は、各橋梁、各部材毎に、 $1 \sim 0.8y_0$ の間の任意の年数を与えた。

3.3 補修時期と健全度の経年的推移

本研究においては、耐用年数が与えられると、その部材の劣化の基本的な推移は決定されるが、維持補修計画開始年度までの使用年数、及び補修が実施される時期との関係で、健全度の経年的推移は複雑に変化する。

簡単な例で説明すると以下のようなになる(表-3~5)。

ある部材の耐用年数を10年、使用年数を3年とする。また、 $f=1.5$ 、補修は健全度2で実施される場合を考える。補修が実施される年度は、最初に健全度が2になった年度ではなく、式(1)の左辺を2と置いて解いた結果得られる年度としている。他の健全度の場合も考え方は同じである。この場合、耐用年数が10年であるから、この部材の健全度の基本的な推移は表-3のようになる。しかし、使用年数は3年であるから、計画開始年度は表-3の4年度となり、以降の健全度の推移は表-4になる。ここで、補修は、1回目の健全度2で実施されるから、表-4の5年度に補修が実施され、この部材の健全度は5に回復し、以降また表-3の基本的推移を繰り返すことになる。それが表-5である。結局、表-5がこの部材の最終的に得られる健全度の推移である。

これらより、この部材の年度毎の健全度の推移と補修年度(5年度)およびライフサイクル期間(10年)の補修費が得られることになる。これをすべての橋梁のすべての部材に適用することになる。

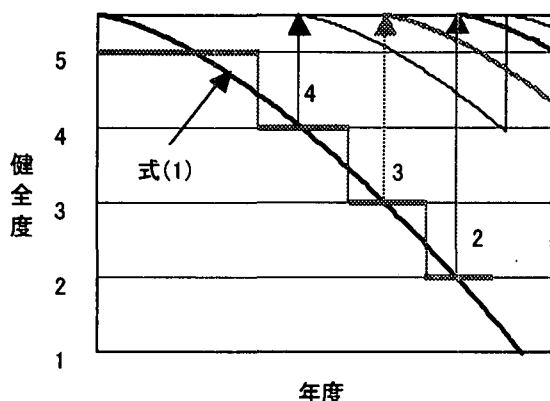


図-5 健全度2, 3, 4で補修された場合の以降の健全度の推移

補修が、健全度2, 3, 及び4で実施された以降の健全度の推移の概念図を表すと、図-5のようになる。

式(1)で計算される値を小数点以下第1位で四捨五入して健全度が得られ、式(1)の値がちょうど2, 3, あるいは4になったときに補修されることを図は示している。

4. 補修費の算定及びユーザーコスト (UC) の考慮

ある橋梁のある部材の補修費は、工事原価と一般管理費の和として計算される。これらの内、工事原価は、純工事費と現場管理費の和となり、さらに、純工事費は、直接工事費、足場工費、及び共通仮設費の和として計算される。このようにして計算された各部材の補修費を橋梁毎に加えてある橋梁の補修費となり、全橋梁で加えてある年度の補修費の総和となる。つまり、各部材の補修工事は個別に発生すると考えて計算している。

この時、一つの橋梁に属する総ての部材の補修費を加算して直接工事費としそれから工事原価等を計算することも考えられるが、上記のように、それぞれの部材の補修は、ある年度内の別の時期に個別に発生すると仮定して補修費用の算定を行った。

また、補修工事の内容によっては、通行止めがあることを想定し、その場合の損失をユーザーコスト(UC)¹⁰⁾として評価した。

以下に、直接工事費として各部材の補修費の算定根拠、足場工費、及びUCの利用について簡単に説明する。

4.1 直接工事費

直接工事費は、各部材毎に健全度に応じて損傷領域の推定をし、それに対応する対策工法を定めて計算式⁹⁾を作成した。各部材毎の基本的な考え方を説明すると以下のようになる。

(1) 床版

道々には、鋼床版がほとんど無いため、すべてコンクリート床版とした。健全度4では主桁長さの10%にひび割れが入った事を想定し、樹脂系の注入を施すとした。健全度3では主桁長さの20%にひび割れと床版の断面0.1m³に深さ10cm

の剥離があったことを想定し、ひび割れには樹脂系の注入工、剥離の断面修復にはポリマー系の断面復旧工を施すとした。健全度2では主桁長さ30%にひび割れと床版の桁下面積の10%に剥離があったことを想定し、健全度3と同様にひび割れには樹脂系の注入工、剥離の断面修復にはポリマー系の断面復旧工を施すとした。健全度1では床版の打ち替えを行うこととした。

(2) 主桁

主桁に関しては、構造形式によって計算方法が異なる。

単純桁(合成)、単純桁(非合成)、連続桁(非合成)の鋼桁においては、健全度4から2において局部的な腐食や全体的な腐食が発生することを想定し、健全度4では10%塗り替え、健全度3では25%塗り替え、健全度2では50%塗り替えを行うこととした。健全度1では鋼桁の取替えが行われるとし、有効幅員と支間長の関係より鋼重を算定して計算を行うこととした。

プレテンT桁及びポステンT桁においては、健全度4から2までは床版と同様の対策工法をとり、健全度1では桁下部に炭素繊維シート接着工を施すとした。

プレテン中空床版及びポステン中空床版においては、主桁本数を1本として、床版は主桁に含まれるとして計算を行った。健全度に応じた対策工法はプレテンT桁、ポステンT桁と同様である。

(3) 橋脚、橋台

橋脚、橋台に関しては、健全度4では橋脚、橋台の外周にひび割れが入った事を想定し、樹脂系の注入を施すとした。健全度3では橋脚、橋台の外周にひび割れと1.0m³未満の剥離があったことを想定し、ひび割れには樹脂系の注入工、剥離の断面修復にはポリマー系の断面復旧工を施すとした。健全度2では橋脚、橋台への樹脂系の注入と1.0m³以上の剥離を想定して、ひび割れにはコンクリート樹脂系の注入工、剥離の断面修復にはポリマー系の断面復旧工を施すとした。健全度1においては橋脚、橋台全体にコンクリートを巻き立てることとした。

(4) 伸縮装置

伸縮装置に関しては数量を(径間数+1)と仮定し、健全度4では無補修、健全度3では25%取り替え、健全度2では50%取り替え、健全度1では全取替えとした。

(5) 支承

支承に関しては、健全度4では無補修、健全度3では全基数の支承防錆を施すこととした。健全度2では半基数の取替え、健全度1では全基数の取替えを行うこととした。また、支承は支間によって1基当りの単価が違いため橋長を3種類に分類して計算を行った。

(6) 橋面工

橋面工に関しては、アスファルト舗装を、それぞれ健全度4では橋面積(橋長と有効幅員の積)の10%取替え、健全度3では25%取替え、健全度2では50%取替えとし、健全度1では全取替えとした。

これらの直接工事費の計算式を表-6に示した。

表-6 直接工事費の計算式 (1)

鋼橋

健全度	床版				
	損傷状態	対策工法	損傷領域	数量	単価
5	-	-	-	-	-
4	ひび割れ	注入	$0.1 \times \text{主桁長}$	$L(n+1) \times 0.1$	$6.5u/m$
3	ひび割れ 剥離	注入	$0.2 \times \text{主桁長}$	$L(n+1) \times 0.2$	$6.5u/m$
		断面修復	$0.1m^2 \times 0.1m$	$0.1m^2 \times 0.1m$	$1010u/m^3$
2	ひび割れ 剥離 鉄筋腐食	注入	$0.3 \times \text{主桁長}$	$L(n+1) \times 0.3$	$6.5u/m$
		断面修復	$0.1 \times Ag$	$Ag \times 0.1 \times 0.1$	$1010u/m^3$
1	-	床版打替	橋面積全体	橋面積	$75u/m^2$
主桁					
5	-	-	-	-	-
4	-	塗装	$0.1 \times \text{全面積}$	$2n'hL \times 1.3 \times 0.1$	$5u/m^2$
3	局部腐食	塗装	$0.25 \times \text{全面積}$	$2nhL \times 1.3 \times 0.25$	$5u/m^2$
2	全体腐食	塗装	$0.50 \times \text{全面積}$	$2nhL \times 1.3 \times 0.50$	$5u/m^2$
1	-	部材取替	主桁全体	鋼重の計算式	$1100u/t$

ポステン、プレテンT桁

健全度	床版				
	損傷状態	対策工法	損傷領域	数量	単価
5	-	無補修	-	-	-
4	ひび割れ	注入	$0.1 \times \text{主桁長}$	$L \times (n+1) \times 0.1$	$6.5u/m$
3	ひび割れ 剥離	注入	$0.2 \times \text{主桁長}$	$L \times (n+1) \times 0.2$	$6.5u/m$
		断面修復	$0.1m^2 \times 0.1m$	$0.1m^2 \times 0.1m$	$1010u/m^3$
2	ひび割れ 剥離 鉄筋腐食	注入	$0.3 \times \text{主桁長}$	$L \times (n+1) \times 0.3$	$6.5u/m$
		断面修復	$0.1 \times Ag$	$As \times 0.1 \times 0.1$	$1010u/m^3$
1	-	打替	As	As	$37u/m^2$
主桁					
5	-	無補修	-	-	-
4	ひび割れ	注入	$0.1 \times \text{主桁長}$	$L \times n \times 0.1$	$6.5u/m$
3	ひび割れ 剥離	注入	$0.2 \times \text{主桁長}$	$L \times n \times 0.2$	$6.5u/m$
		断面修復	$0.1m^2 \times 0.1m$	$0.1m^2 \times 0.1m$	$1010u/m^3$
2	ひび割れ 剥離 鉄筋腐食	注入	$0.3 \times \text{主桁長}$	$L \times n \times 0.3$	$6.5u/m$
		断面修復	$0.1 \times Ag$	$Ag \times 0.1 \times 0.1$	$1010u/m^3$
1	-	シート貼付	Ag	$L \times B \times 0.9$	$50u/m^2$

ポステン、プレテン中空床版

健全度	主桁				
	損傷状態	対策工法	損傷領域	数量	単価
5	-	無補修	-	-	-
4	ひび割れ	注入	$0.1 \times \text{主桁長}$	$L \times 0.1$	$6.5u/m$
3	ひび割れ 剥離	注入	$0.2 \times \text{主桁長}$	$L \times 0.2$	$6.5u/m$
		断面修復	$0.1m^2 \times 0.1m$	$0.1m^2 \times 0.1m$	$1010u/m^3$
2	ひび割れ 剥離 鉄筋腐食	注入	$0.3 \times \text{主桁長}$	$L \times 0.3$	$6.5u/m$
		断面修復	$0.1 \times Ag$	$Ag \times 0.1 \times 0.1$	$1010u/m^3$
1	-	シート貼付	Ag	Ag	$50u/m^2$

表-6 直接工事費の計算式 (2)

鋼橋・コンクリート橋共通

健全度	橋脚				
	損傷状態	対策工法	損傷領域	数量	単価
5	-	-	-	-	-
4	ひび割れ	注入	橋脚外周	2B	$6.5u/m$
3	ひび割れ 剥離	注入	橋脚外周	2B	$6.5u/m$
		断面修復	1m ² 未満	$1.0m^2 \times 0.15m$	$1010u/m^3$
2	ひび割れ 剥離 鉄筋腐食	注入	橋脚外周	2B	$6.5u/m$
		断面修復	1m ² 以上	$2B \times 0.15m^2$	$1010u/m^3$
1	-	コンクリート 巻立	橋脚全面積	$2B \times \text{橋脚高さ}$	$80u/m^2$
橋台					
5	-	-	-	-	-
4	ひび割れ	注入	橋台外周	2B	$6.5u/m$
3	ひび割れ 剥離	注入	橋台外周	2B	$6.5u/m$
		断面修復	1m ² 未満	$1.0m^2 \times 0.15m$	$1010u/m^3$
2	ひび割れ 剥離 鉄筋腐食	注入	橋台外周	2B	$6.5u/m$
		断面修復	1m ² 以上	$2B \times 0.15m^3$	$1010u/m^3$
1	-	コンクリート 巻立	橋台全面積	$2B \times \text{橋台高さ}$	$80u/m^2$
伸縮装置					
5	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
3	-	取替	1/4取り替え	$B \times 0.25 \times (N+1)$	$170u/m$
2	-	取替	1/2取り替え	$B \times 0.50 \times (N+1)$	$170u/m$
1	-	取替	全取り替え	$B \times 1.00 \times (N+1)$	$170u/m$
支承					
5	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
3	局部腐食	塗装	全基数	n	10u
2	局部腐食 亀裂	取替	半基数	$n \times 0.5$	$L(m)=$ $20m:500u$
1	全面腐食 亀裂	取替	全基数	$n \times 1.0$	$20-50m:750u$ $50m:1000u$
橋面工					
5	-	-	-	-	-
4	-	取替	1/10取り替え	橋面積 $\times 0.10$	$5u/m^2$
3	-	取替	1/4取り替え	橋面積 $\times 0.25$	$5u/m^2$
2	-	取替	1/2取り替え	橋面積 $\times 0.50$	$5u/m^2$
1	-	取替	全取り替え	橋面積 $\times 1.00$	$5u/m^2$

記号の定義

L : 橋長(m) B : 有効幅員(m)
 H : 主桁高さ(m) A_g : 桁下面積(m²)
 A_s : 床版下面面積(m²) N : 径間数
 n : 主桁本数

なお、鋼橋・コンクリート橋共通の支承の単価は1基当りの単価である。また、単価は総て1000unitである。

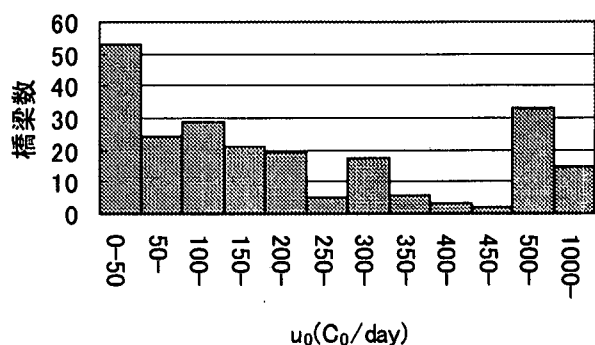


図-6 227 橋の u_0 の分布

4.2 足場工費

本研究では間接工事費として、橋梁の補修の際に仮設する床版及び主桁の足場工(パイプ吊足場)を補修費に加えた。損傷領域は必ずしも同一箇所にあるとは限らないので、足場工の架設場所を橋面積全体とし、それに単位面積あたりの単価を掛けて計算を行った。

4.3 通行止めによる UC の発生

補修が行われる部材、あるいは損傷の程度によっては通行止め、あるいは交通に何らかの制限が課せられることがある。それらによる損失を UC として計算し、補修費にこの UC を加えて本研究では LCC と定義した。

床版、伸縮装置、橋面工においては、健全度 2 で実施される補修に対して 1 日の通行止め、健全度 1 で実施される補修に対して 1 あるいは 3 日の通行止め、鋼桁の健全度 1 で実施される補修工事に対して 7 日間の通行止め日数を与えた。これらに橋梁毎に計算されている¹⁾ユーザーコスト u_0 を乗じて利用者が蒙る損失を評価した。本研究で計算対象としている 227 橋の u_0 の分布を、図-6 に示した。

上記の通行止め日数は工事内容から考えると少なめであるが、工事が行われても完全通行止めはなく、交互交通で交通が確保されることを想定して、少な目の設定とした。

5. 橋梁群モデルへの GA 適用

本研究では、各橋梁の初期状態を設定後、経年的に各部材の健全度を追跡して所定の健全度に達したら補修工事が行われるとする計算例と同時に、補修時期に関する最適化計算も行っている。

以下に本研究の最適化問題の定式化、GA のコーディング、デコーディングについて説明する。

5.1 最適化問題の定式化

本研究では補修の実施順、補修部材の決定に最適化手法 GA を用いている。目的関数、制約条件、設計変数を以下に示す。

- ・目的関数：設定されたライフサイクル期間内の補修費と UC の総和の最小化
- ・制約条件：各年度の補修費があらかじめ設定した予算の制限を超えない

・設計変数：各橋梁、各部材の補修を行う年度

補修費は、前節で説明された考え方で計算される。

UC については、前記のとおりであるが、さらに、最適化計算の過程で部材の健全度が 1 になっても補修が必ず行われるとは限らないことを考慮した。つまり、最適化計算のペナルティと同様の考え方により、部材の健全度が 1 になると、その橋梁はこれ以上の供用は危険とみなし、1 年間で 100 日単位の通行止め日数を設定している。

制約条件は各年度での補修費が予算の制限を超えないこととし、UC は予算の制限には含まない。

5.2 GA のコーディング

設計変数は補修を行う年度としたが、各橋梁ごとに 7 部材あるとし、ライフサイクル期間を 50 年とすると、各部材各年度毎に補修のあるなしを (0, 1) の 2 進数でコーディングを行うと 1 橋当たり設計変数の数は 350 変数となり効率的とはいえない。そこで本研究では 1 部材に対してライフサイクル期間中に最大実施される補修回数を設定し、補修が実施される年度を 10 進数でコーディングを行った。これにより、1 橋当たりの設計変数を 40 程度に減少することができた。

デコーディングの説明を簡略にするために小規模な問題を設定する。1 橋梁は 3 部材からなるとし、ライフサイクル期間を 20 年、その間の補修回数 3 回とする。1 橋梁あたりの設計変数の数は 9 となり、それが次のように得られたとする。

・・・10 17 5 9 1 15 3 15 13・・・

これを取り出し、部材毎に切り分けると次のようになる。

[10 17 5][9 1 15][3 15 13]

各部材毎に数字(年度)の若い順に並べ替える。

[5 10 17][1 9 15][3 13 15]

これらが、各部材毎に補修が入る年度になる。例えば部材 1 であれば、5 年度、10 年度、17 年度に補修が行われることになる。このとき、同じ年度が現れれば、一方は無視される。つまり、ライフサイクル期間中の補修回数は 2 回となる。また、該当年度の部材の健全度が 5 であれば、この年度もやはり無視されることになる。

6. 補修が行われる健全度を固定した場合の補修費の計算と最適化計算の結果

以上説明した橋梁データベースの再生、健全度の経年的推移、補修費の算定方法、及び最適設計問題の定式などの考え方にに基づき、数値計算を試みた。

計算は、補修が実施される健全度を指定し、橋梁、部材に関わらず指定された健全度になったら補修が実施(3.3 の考え方で補修年度が決定される)されるという単純な戦略による例(10 橋と 227 橋)と、前節の GA による最適化の例(10 橋)の 2 つを示している。

6.1 10 橋の例

10 橋の例は、上記の単純な戦略の効果を GA による結果で検証するために行われる。

表-7 10橋の詳細データ

橋梁 番号	径間 数	橋長 (m)	主桁 高さ	有効 幅員	下部工 高さ	主桁本 数	u_0 (C_0 /day)	構造形式	耐用年数						
									1	2	3	4	5	6	7
1	4	91	1.10	10.1	6.1	6	139	I桁(合成)	24	28	42	31	16	27	22
2	1	20	1.20	9.5	5.7	5	1401	I桁(合成)	20	18		38	22	29	29
3	1	37	1.85	26.0	7.0	14	557	プレテンT桁	20	26		42	20	32	18
4	1	20	0.75	16.0	8.1	1	2171	プレテン中空床版		30		34	15	31	22
5	3	144	1.56	7.0	5.2	3	55	I桁(非合成)	18	16	41	40	23	25	24
6	2	40	1.26	10.4	7.5	5	522	I桁(非合成)	22	17	42	44	21	29	22
7	1	35	1.97	11.5	12.0	5	263	I桁(非合成)	18	21		36	22	24	23
8	2	45	1.48	5.0	8.4	4	37	ポステンT桁	20	30	37	41	18	31	21
9	4	111	0.91	13.2	9.3	1	0	ポステン中空床版		28	37	40	12	33	22
10	3	92	0.95	11.5	4.2	1	91	ポステン中空床版		33	43	40	20	32	21

各橋梁毎に7部材,50年間のライフサイクル期間を考えることにする。対象とする橋梁は、鋼橋5橋、コンクリート橋5橋の10橋を使用した。これらは、それぞれ227橋から任意に選んだ。それらの橋梁のデータを表-7に示した。表の u_0 の単位の C_0 は時間コストであり、本研究では1800unit⁽¹⁾として計算している。耐用年数の下の1~7の数字は部材番号を示しており、それぞれ、床版、主桁、橋脚、橋台、伸縮装置、支承、および橋面工に対応している。橋梁番号2,3,4,7については、1径間のため部材番号3の橋脚の耐用年数はない。また橋梁番号4,9,10については中空床版橋であるため、床版と主桁を一体と考え、部材番号2の主桁にまとめたので部材番号1の床版の耐用年数は存在していない。

計算はGAの計算結果と、すべての部材を健全度4で補修した場合の計算結果、以下同様に健全度3および健全度2で補修した場合の計算結果の4種類を示す。式(1)の係数 f の値が1.0と1.5に対応する計算結果を表-8,9,および図-7~12に示した。

表中で健全度4で補修された場合に、補修実施時の健全度が3の場合の回数が87($f=1.0$)あるいは72回($f=1.5$)と示されている。これは7部材中伸縮装置と支承の2部材は健全度4の時は補修が行われないため、例外として健全度3で補修を行っているためである。

(1) 指定健全度で補修が実施される場合の計算結果

健全度2,3,あるいは4で補修が実施された場合の結果を表-8,9と比較すると、 f の値に関係なく健全度3で補修を行った場合が補修費あるいはLCCが一番低く、次に健全度4で補修を行った場合となっている。これは健全度4での補修は、1回当たりの補修費は安い、その代わり補修回数が多い(440回あるいは309回)、また健全度2で補修を行った場合は補修回数は少ない(188回あるいは175回)が、1回当たりの補修費が高いためと考えられる。

これらの表のUC欄に示されているように、健全度3あるいは4で補修が実施された場合はUCが発生していない。これは、通行止め日数は健全度1,2の場合のみ発生するので、健全度3,4で補修を行った場合は通行止めが発生しないためである。一方、健全度2で補修が実施された場合のUCは8050万unit($f=1.0$)あるいは8224万unit($f=1.5$)であっ

た。健全度2で補修を行う場合は床版、伸縮装置、橋面工の3部材について通行止め日数が発生するためである。

補修費の経年的推移を表したのが図-7,9($f=1.0$)および図-8,10($f=1.5$)である。図より健全度2で補修された場合は各年度の補修費は他の指定健全度の場合に比べて一般的に高く、また年度毎のばらつきが大きい。健全度3,4で補修された場合は比較的平坦に推移しており、健全度2で補修された場合と比べれば年度毎のばらつきは少ない。

橋梁別の補修費を図-11($f=1.0$)および図-12($f=1.5$)に示した。図は縦軸に1橋あたりの補修費、横軸に橋梁番号をとっている。上記と同じ傾向であるが、橋梁毎の補修費も、健全度2で補修された場合が際だって高く、健全度3,4で補修された場合はほぼ同様であるが若干健全度4の場合が高いという結果になった。橋梁別に見ると橋長が長いあるいは有効幅員の広い橋梁1,3,5,9の補修費が高くなっている。

係数 f の影響は、値が大きいくちが劣化進行速度は遅くなり、補修費が相対的に少なくなることは予想されるが、表-8,9を比較すると、 $f=1.5$ の結果の方が、1.0の場合よりLCCの値は2割程度少ないという結果が得られている。

(2) GAの計算結果

次にGAを用いて⁽¹²⁾補修実施橋梁、補修部材、補修程度および補修実施年度の最適化を試みた結果を示す。GAのパラメータは、人口サイズは400、交叉は5点交叉、交叉確率は80%、突然変異確率は5%、繁殖淘汰法はエリート保存法で20%保存している。年度予算の上限値は1200万unit、ライフサイクル期間(50年)中に1部材に最大入る補修回数は5回に設定している。10進数でコーディングしているのは前記のとおりである。予算制約の値は、前項に説明した単純な戦略による結果を参考にして、制約条件が効く値として設定した。

GAによる計算結果も、前記の結果と同様に表-8,9,および図-9,10に併記されている。

補修健全度指定の場合に一番LCCの値が少なかった指定健全度3の場合と比較すると、GAによるLCCの値は健全度3で補修を行った場合の35%~40%程度少なくなっている。GAによる計算は年度予算の制約が入っているため、補修健全度指定の場合よりは厳しい条件下で行われた結果であるため、実質的な差は上記以上にあると考えられる。

表-8 $f=1.0$, 10 橋の場合の補修健全度指定と GA の結果の比較

f=1.0 10橋	($\times 10^6$ unit)				補修 回数	補修時健全度		
	補修費	UC	LCC	年度予算		4	3	2
健全度4	702.30	0.00	702.30	制限無し	440	353	87	0
健全度3	561.80	0.00	561.80	制限無し	226	0	266	0
健全度2	1121.00	80.50	1201.50	制限無し	188	0	0	188
GA	360.10	5.79	365.89	12	217	107	99	11

表-9 $f=1.5$, 10 橋の場合の補修健全度指定と GA の結果の比較

f=1.5 10橋	($\times 10^6$ unit)				補修 回数	補修時健全度		
	補修費	UC	LCC	年度予算		4	3	2
健全度4	494.10	0.00	494.10	制限無し	309	237	72	0
健全度3	461.10	0.00	461.10	制限無し	221	0	221	0
健全度2	1034.00	82.24	1116.24	制限無し	175	0	0	175
GA	321.00	9.72	330.72	12	182	98	76	8

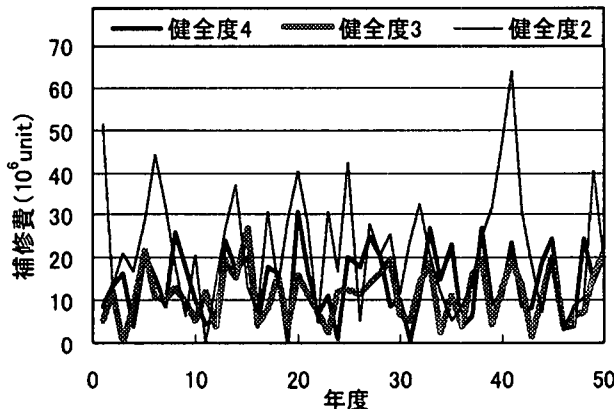


図-7 補修健全度別コストの推移 ($f=1.0$)

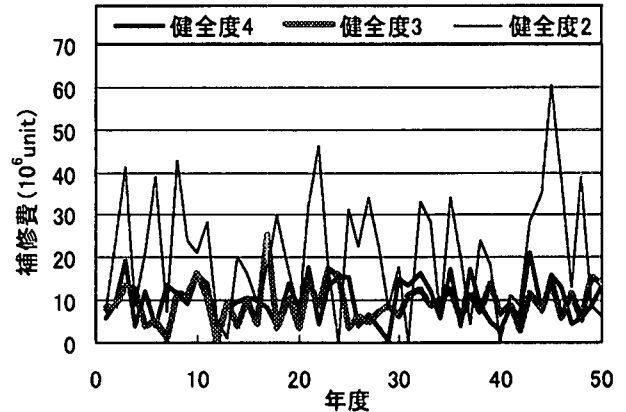


図-8 補修健全度別コストの推移 ($f=1.5$)

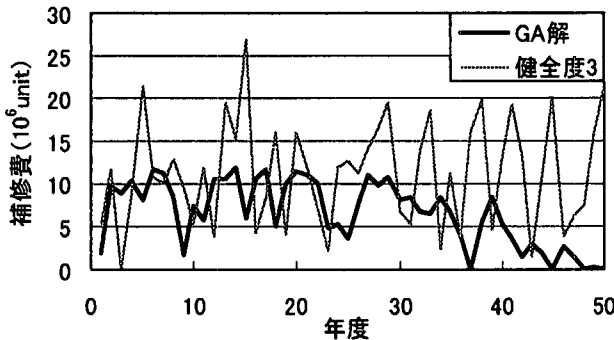


図-9 補修健全度3とGA解のコスト推移の比較 ($f=1.0$)

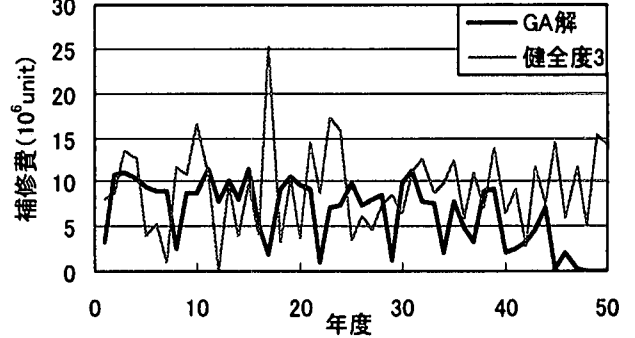


図-10 補修健全度3とGA解のコスト推移の比較 ($f=1.5$)

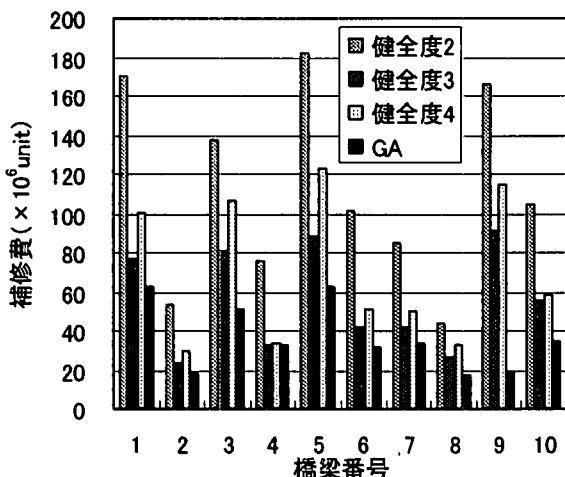


図-11 橋梁別補修健全度別コストの比較 ($f=1.0$)

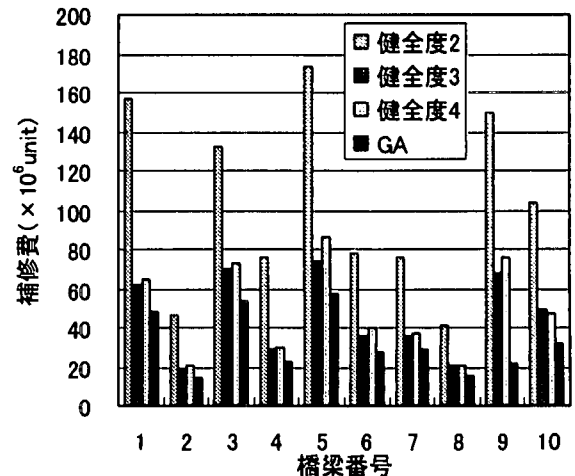


図-12 橋梁別補修健全度別コストの比較 ($f=1.5$)

表-10 227 橋における補修健全度別コスト等の比較(f=1.0)

f=1.0 227橋	(×10 ⁶ unit)				補修 回数	補修時健全度		
	補修費	UC	LCC	年度予算		4	3	2
健全度4	11950	0	11950	制限無し	9194	7346	1848	0
健全度3	9693	0	9693	制限無し	5613	0	5613	0
健全度2	19890	2279	22169	制限無し	3916	0	0	3916

表-11 227 橋における補修健全度別コスト等の比較(f=1.5)

f=1.5 227橋	(×10 ⁶ unit)				補修 回数	補修時健全度		
	補修費	UC	LCC	年度予算		4	3	2
健全度4	8403	0	8403	制限無し	6428	4907	1521	0
健全度3	7902	0	7902	制限無し	4597	0	4597	0
健全度2	18420	2185	20605	制限無し	3632	0	0	3632

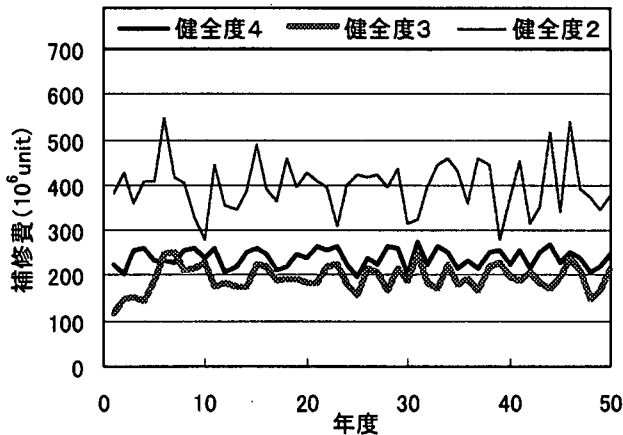


図-13 227 橋の補修健全度別コストの推移 (f=1.0)

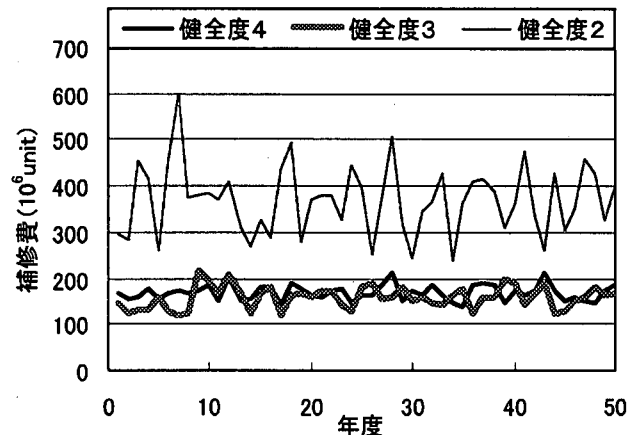


図-14 227 橋の補修健全度別コストの推移 (f=1.5)

補修回数を見ると、f=1.0 も 1.5 の場合も、健全度 3 と 4 で補修が実施される回数はほぼ同じであった。健全度 3 と健全度 4 の補修を組み合わせることで年度予算の制約をクリアしながらトータルのコストを最小化していることがわかる。

補修健全度 3 と GA の結果の補修費の値の経年的な変化の比較を示したのが、図-9(f=1.0) 及び図-10(f=1.5)である。健全度 3 で補修が実施された場合は、年度予算の制限がないため、2500 万 unit まで年度の補修費が達している場合がある。また、GA の結果と比べると年度毎のばらつきは大きい。GA の計算結果は、年度予算の制限(1200 万 unit)があるため、当然制限値以下の補修費の値に収まっている。GA の結果の経年的推移において、ライフサイクル期間の後半にコストの値が下がっているのは、ライフサイクル期間を 50 年と限定した結果のためである。補修費が少ないために、期間末には各橋梁の健全度は一般に下がる傾向が見られる。ライフサイクル期間を無限に設定することはできないので止むを得ない現象と思われるが、今後検討が必要な課題と考えられる。

橋梁別の補修費を同様に図-11(f=1.0)および図-12(f=1.5)に示した。健全度指定と GA の結果を比較すると、規模の小さい橋梁では両者の差は小さいが、規模が大きくなる

と差が大きくなる傾向が見られる。特に、橋梁 9 において GA の結果がかなり少なくなっている。これは、表-7 に見られるように橋梁 9 のユーザーコスト(u_i)は 0 であるため、最適化の計算の中では優先度が下がり、補修が行われる回数が少なかったことによる。ユーザーコストが 0 という結果は、交通量あるいは迂回路の距離などにより出ることがある。これは、該当橋梁の迂回路ネットワークが良いこと、あるいは、重要度が低いことを意味する。その意味で、橋梁 9 への補修費の配分が減少したことは妥当な結果と考えられる。

6.2 227 橋の例

ここでは、227 橋の橋梁群を対象にして、補修が実施される健全度を指定した場合の計算結果を説明する。

各橋梁、各部材の使用年数、耐用年数は 3。に説明した考え方により与えられている。劣化曲線は、前例と同様に、式 (1) の f が 1.0(直線)と 1.5(上に凸)の 2 ケースを与えて計算している。補修が実施される健全度は、やはり前例と同様に 4, 3, 及び 2 としている。

計算結果を表-10(f=1.0)及び表-11(f=1.5)に示す。表中で、健全度 4 で補修する場合に、補修時健全度が 3 で補修

されている理由は、前例と同様である。

表-10、表-11 いずれにおいても、健全度3で補修された時が最も安く、次に健全度4、健全度2の順になった。理由としては、10橋の例と同様に、健全度が低い状態での補修戦略を取ると、補修回数は少なくなるが、1回当りの補修費は高くなる。一方、健全度が高い状態での補修戦略を取ると、補修回数は多くなるが、1回当りの補修費は低くなる。その結果、健全度が3程度で補修を入れる場合が最も安くなったものと思われる。これは、この227橋においても、前例と同様に今後最適化計算を用いることでより良い戦略を立て得ることを示唆しているものと考えられる。

図-13($f=1.0$)および図-14($f=1.5$)に、補修費の経年的変化を示した。健全度2での補修は、やはり高額な補修費と年度毎の大きなばらつきを示しているのに対し、健全度3、4での補修では、低額でかつ年度間のバラツキが少ない結果が得られた。

7. まとめ

北海道の道々にかかる橋梁は、10年後に供用期間が50年を越す数が急増する。建設予算の減少は避けられない中で、今から有効な橋梁維持管理システム(BMS)を構築しなければならぬことは議論の余地のないところと考えられる。

有効なBMSの構築ということは、正確なデータベースに基づく現状の分析能力だけでなく、限られた予算の中で合理的な施策の遂行を保証する意思決定システムが不可欠である。本研究はその意思決定システムを主な対象とする。

得られた事項を箇条書きにすると以下ようになる。

1) 本研究は、実橋のモデルを対象に補修費の計算モデルを構築し、それを利用して最適化計算を行い、結果の分析から簡便で有効な意思決定システムの提案を目的としている。その時、橋梁の諸元、部材の損傷程度に応じる補修費の算定モデル、部材の劣化進行のモデル等が必要となる。ところが、多くの地方公共団体でそうであるように、北海道においても補修費などの計算に必要な橋梁諸元のデータはかなり欠損しているのが実状である。そこで、欠損しているデータは、現存する橋梁のそれぞれの諸元と同じ統計的母集団に属すると仮定して、札幌管轄の、極端にデータの欠損の多くない橋梁群のデータを再生し、227橋のデータをそろえた。

2) 北海道の維持管理マニュアルに従う劣化度(本論文では、同じ値を健全度と置き換えた)に対する劣化の程度の定量化、劣化の程度による補修費算定モデルを作成した。

3) 部材の劣化進行は、ライフサイクル期間の補修費を推定する上で重要な項目である。本研究では、本文の図-3の関係を基本形とし、耐用年数(供用開始から健全度が1になるまでの年数)と使用年数(供用開始から、計画開始年度までの年数)を任意に与えて計算を行った。

4) 数値計算例として、10橋と227橋を対象とし、簡単な戦略の例として、補修を実施する健全度をあらかじめ指定する方法により50年間のライフサイクル期間におけるLCCを算

定した。計算の結果、比較的損傷が軽い状態である、健全度3で補修する場合が最もLCCが少ないという結果が得られた。5) 10橋を対象にGAを用いて最適化を試みた。設計変数の数は400の問題となる。得られたLCCは、年度予算の制約が入っているにもかかわらず、補修健全度を指定する方法よりも35%~40%程度少なかった。またユーザーコストの値が少ない橋梁に対する補修費の配分が少なくなるなど、妥当な結果が得られたと考えられる。補修が実施される健全度は、3と4がほぼ同数であり、他はほとんど現れなかった。

まだ十分な考察ができるほどの計算は終了していないが、今後、より大規模な問題の最適化を試み、予算制約の影響、劣化曲線の影響、補修実施健全度などを検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) Hudson, W.R., Haas, R. & Uddin, W.: Infrastructure Management, McGraw-Hill, 1997.
- 2) Ryall, M. J.: Bridge Management, Planta Tree, 2001.
- 3) 夏秋・向台・保田・古田: 連続桁RC床版の打設順序決定問題への遺伝的アルゴリズムの応用, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp. 627-633, 1995.
- 4) 近田・橋・城戸・小堀: GAによる既存橋梁の補修計画支援の試み, 土木学会論文集, No. 513/I-35, pp. 151-159, 1995.
- 5) 築山・古田・堂垣: 道路橋の維持管理計画支援システムへのウイルス型GAの適用, 第7回システム最適化シンポジウム講演論文集, pp. 7-12, 2001.
- 6) 近田・清水・廣瀬: 橋梁補修計画へのウイルス進化型GAの適用に関する研究, 構造工学論文集 Vol. 48A, pp. 195-202, 2002.
- 7) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会: PC道路橋計画マニュアル, 1997.
- 8) 伊藤・岩田・貝沼: 鋼材の腐食耐久性評価のための環境促進実験とその促進倍率に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol. 48A, pp. 1021-1029, 2002.
- 9) 札幌土木現業所橋梁補修委員会: 橋梁維持管理マニュアル(案), (財)北海道建設技術センター, 2002.
- 10) 杉本・首藤・後藤・渡邊・田村: 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.
- 11) 杉本, 他4名: ユーザーコストに関する一考察, 土木学会北海道支部論文報告集, 第58号, pp. 4-7, 2002.
- 12) 杉本・鹿: 工業最適設計のための汎用GAプログラムについて, 北海学園大学学術論集, 第96・97号, pp. 81-105, 1998.
- 13) 後藤: 橋梁点検とユーザーコストを利用した北海道型簡易BMSの提案, 平成13年度北海学園大学修士論文, 2002.

(2003年4月18日受付)