

予算平準化を考慮した橋梁維持管理計画の最適化について

On optimization of the bridge maintenance management plan in consideration of budget smoothing

北海学園大学大学院工学研究科 ○学生員 澁谷直隆 (Naotaka Shibuya)
北海学園大学工学部社会環境工学科 正員 杉本博之 (Hiroyuki Sugimoto)

1. まえがき

我が国では戦後の国土復興に始まり、国民生活の向上や経済の発展を目的とした社会資本の整備が多く行われてきた。特に昭和30年から昭和40年の高度経済成長期において道路や上下水道、ダムといった社会基盤施設が急速に建設された。これらの構造物は経年と共に劣化し、適切な維持管理が求められる。各地方自治体の管理する橋梁も維持補修の必要な構造物の1つである。それらの橋梁の半数は今後十数年の間に一般的な寿命と考えられる供用年数50年を迎える。供用年数50年を迎えた橋梁は必ずしも重大な損害が発生するわけではないが、損傷の顕著な橋梁に対しては大規模な補修を行うことが望ましい。しかし、少子高齢化や社会福祉など課題も多く、一般的に財政は逼迫している。このため、全ての橋梁に対する多額の投資は実質的に不可能である。現在多くの地方自治体において橋梁長寿命化修繕計画の策定が行われている。しかし、多数の橋梁を対象とした維持管理計画の策定は複雑な作業を強いられることとなり、多くの時間と労力を要する。これらのことから、橋梁維持管理計画の策定に最適手法の適用が必要と考えられる。本研究では実務において一般に取り入れられている維持管理区分の設定を特に考慮し、平準化を考慮しながら、GA¹⁾による350橋の維持管理計画の策定を試みる。

2. 問題の定式化

実務においては、架橋されている路線の重要度や橋梁の規模などにより維持管理区分を設定し、それぞれの橋梁群に対してその区分に適した維持管理計画が行われている。本研究においても対象橋梁を「優先橋梁」、「通常橋梁」、「小規模橋梁」の3つの橋梁群に分類した。「優先橋梁」は災害時等のネットワークの確保の上で重要な橋梁や第三者被害の危険性がある橋梁であり、高い維持管理水準を適用する。「通常橋梁」は優先橋梁を除く一定以上の規模の橋梁である。「通常橋梁」に対しては予防保全を原則とし、損傷がある程度以下になる前に何らかの処置を行う。「小規模橋梁」は一般にはBMSに適用されない規模の橋梁であり、実務においては積極的な補修の対象とならない橋梁群と考えられる。

本研究では、初めに通常橋梁および優先橋梁を対象とした場合の定式化と、その後に行う小規模橋梁を対象とした定式化の2つを行った。どちらの定式化においても目的関数を計画期間内の維持管理費用の最小化、制約条件として年度予算の制約と健全度の制約を与えている。LCCの計算は、ある地方の建設部（以下、建設部とす

る）が実際の積算において使用した補修工事資料より作成したコストモデルと各橋梁、各部材、各損傷における定期点検の結果を反映し補正した劣化曲線とを対応させることを行っている。^{2) 3)}

ここで、通常橋梁および優先橋梁の定式化について説明する。一般的に橋梁を分類し優先橋梁を設定した計画を策定する場合、優先橋梁に対しては補修順位の設定あるいは点検間隔の短縮といった対応がとられる。ここでは、これらの考え方を取り入れず、優先橋梁に対しては満足すべき維持管理水準を高く設定することで対応した。これは、優先橋梁の維持管理においては、常に健全な状態を維持することが重要であると考えたためである。

本研究においては、計画期間を初期および後期に分割しそれぞれに予算制約を与えた、本研究では初期は計画開始より10年間としている。また、後期とは計画期間において設定した初期以降を示すものとする。

通常橋梁の健全度の制約条件は、劣化進行が極端に早く進むことを防ぐために、健全度が2.0を下回らないこととした。また、優先橋梁の健全度制約は計画期間中に高い水準を維持しなくてはならないことを考慮し健全度が3.5を下回らないこととした。

目的関数、制約条件、および設計変数を以下に示す。

$$\text{○ 目的関数: } OBJ = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{y=1}^{NY} C_{iy} \rightarrow \min \quad (1)$$

○ 制約条件:

・ 予算制約条件

$$g(y) = \sum_{i=1}^{NB} C_{iy} - B_1 \leq 0 \quad (y=1 \sim NYE) \quad (2)$$

$$g(y) = \sum_{i=1}^{NB} C_{iy} - B_2 \leq 0 \quad (y=NYE+1 \sim NY) \quad (3)$$

・ 通常橋梁の健全度制約条件

$$g(NY+i) = 2 - R_i^{\min} \leq 0 \quad (i=1 \sim NB-NBP) \quad (4)$$

・ 優先橋梁の健全度制約条件

$$g(NY+i) = 3.5 - R_i^{\min} \leq 0 \quad (i=NB-NBP \sim NBP) \quad (5)$$

○ 設計変数:

$$\text{通常橋梁の補修レベル } h_{1j} \quad (j=1 \sim NG) \quad (6)$$

$$\text{優先橋梁の補修レベル } h_{2j} \quad (j=1 \sim NG) \quad (7)$$

$$\text{点検間隔 } s_i \quad (i=1 \sim NB) \quad (8)$$

ここで、OBJは目的関数(円)、NBは対象橋梁数、NBPは優先橋梁数、NYEは初期年数、NYはライフサイクル期間、NGは部材グループ数、 C_{iy} は橋梁*i*にお

いて y 年度に発生する総費用 (円), $g(y)$ は y 年度の予算の制約条件 (円), B_1 は初期の年度予算 (円), B_2 は後期の年度予算 (円), $g(NY+i)$ は橋梁 i の健全度の制約条件, R_i^{\min} は 11 年目以降の橋梁 i の健全度の部材中の最小値, h_{1j} は通常橋梁の部材グループ j の補修レベル, h_{2j} は優先橋梁の部材グループ j の補修レベル, s_i は橋梁 i の点検間隔を表す. 補修レベルとは補修実施の判断基準となる値であり, 点検時の部材健全度が h_{1j} あるいは h_{2j} 以下であった場合に翌年度に補修を行う. また, 点検間隔とは点検を行う間隔年を表す. 本研究では補修レベルを 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 の 4 種, 点検間隔は 2 年~9 年の 8 種を候補値とした. 補修レベルは 3 種の部材グループごとに全橋梁で統一した変数であり, 点検間隔は対象とする各橋梁に設定される. ここで部材グループとは本研究において作成したコストモデルの傾向によって区分したものであり, どの健全度においても補修費用が一定の伸縮装置を部材グループ 1 (G1), 健全度が低下するにつれて補修費用が比例的に増加する傾向を示した床版, コンクリート橋主桁, 躯体および橋面工を部材グループ 2 (G2), 劣化が進行し部材の健全度がある一定の状態を下回ると補修費用が急増する傾向を示す支承および鋼橋主桁を部材グループ 3 (G3) とした.

既存の研究では設計変数は補修時期を設定している場合が多くみられたが, 補修は点検によって発見された損傷の評価が維持管理水準を割り込んでいた場合の翌年に行われること, および地方の管理者によっては費用削減のために長い点検間隔を採用することを希望している場合があることを考慮した.

予算制約は, 初めに明らかに余裕のある値から開始し徐々に減額させる. すると後期の最適化の予算制約はアクティブにはならず, 健全度制約がアクティブになる B_1 に達する. B_1 が前期の予算制約となる. 次に, 後期の予算制約を減額させると, どうしても後期において許容解を得ることが不可能になる. この B_2 が後期の予算制約になる.

また, 実橋梁を対象とした場合, かなりの部材の初期の健全度は低い状態の場合が多く, 単純に最適化手法を適用すると, 健全度に関する制約条件が満足されないために許容解がないという状態になる可能性がある. そこで, 実務でも計画当初の数期間は, 健全度の完全な回復は期待しないように, 本研究では計画当初からの 10 年間 (初期) は, 健全度に関する制約条件は厳密には適用せず, 緩和して適用し最適化を試みる.

通常橋梁および優先橋梁の最適化を行った結果, 初期以後の十数年間にわたり年度費用に凹凸がある期間が生じた. この期間は対象としている橋梁のほとんどが, 初期に一定の水準まで健全度が回復しており, 補修を必要としない. 初期の予算制約をさらに低くすることにより, 初期の補修を後期に繰り越し, この期間に行うことも考えられる. しかし, 本研究において用いている予算制約は許容解の得ることができる最小の値としているため, 初期の予算制約をこれ以上低く設定することが難しい. 一方, 年度費用平準化は長期的な維持管理計画の策定における課題の 1 つである. 筆者らはすでに予算制約と総

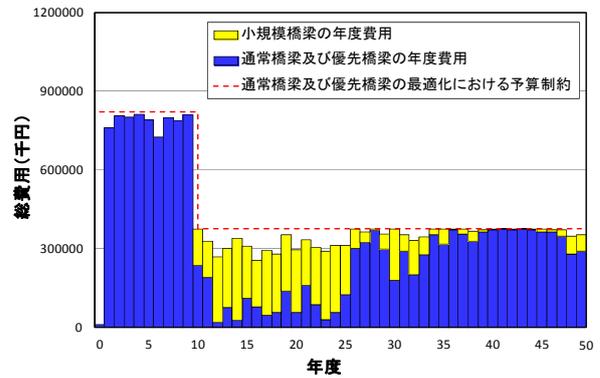


図-1 小規模橋梁による総費用の凹凸の充填の概念図

費用の関係について示し⁴⁾, 厳しい予算制約のもとでは計画期間内の総費用が増加するという結果を得ている. しかし, 厳しい財政状態においては年度費用をできるだけ低額かつ均一にすることが求められる. 年度費用の平準化を行い, かつ管理者に具体的な予算の確保の指針を示すことが実務において必要とされている.

そこで, 通常橋梁と優先橋梁の最適化において発生した予算と総費用の差を制約条件とし, 追加的に小規模橋梁の維持管理計画の最適化を行い, 費用の凹凸を充填することにより平準化を同時に行う手法を試みる. このときの概念図を図-1 に示す. 図-1 において青の棒グラフが通常橋梁および優先橋梁の最適化の結果より得られる年度費用であり, 赤の破線がその最適化で用いた予算制約である. また, 小規模橋梁を対象とした場合の計算における補修費用を黄の棒グラフで示す. 図のように通常橋梁および優先橋梁の補修費用の青の棒グラフだけでは凹凸が見られるが小規模橋梁の補修費用が充填されることで総費用の凹凸の改善がされている.

このときの予算制約は前述のように通常橋梁および優先橋梁の最適化で設定した年度予算 B_2 と年度費用 C_{iy} の差である BS_y としている. これを式 (9) に示す.

$$BS_y = B_2 - \sum_{i=1}^{NB} C_{iy} \quad (y=11 \sim NY) \quad (9)$$

以上の制約条件を踏まえた上での小規模橋梁の最適化における目的関数, 制約条件, 設計変数を以下に示す.

○ 目的関数: $OBJ = \sum_{i=1}^{NBS} \sum_{y=1}^{NY} CS_{iy} \rightarrow \min \quad (10)$

○ 制約条件:

・ 予算制約条件

$$g(y) = \sum_{i=1}^{NBS} CS_{iy} - BS_y \leq 0 \quad (y=11 \sim NY) \quad (11)$$

・ 健全度制約条件

$$g(NY+i) = 1.5 - R_i^{\min} \leq 0 \quad (i=1 \sim NBS) \quad (12)$$

○ 設計変数:

補修レベル $h_j \quad (j=1 \sim NG) \quad (13)$

初期点検年 $sy_i \quad (i=1 \sim NB) \quad (14)$

点検間隔 $s_i \quad (i=1 \sim NB) \quad (15)$

ここで NBS は対象とした小規模橋梁数, BS_y は y 年度における予算制約 (円), CS_{iy} は橋梁 i における y 年度に発生する総費用 (円), sy_i は橋梁 i における初期

点検年である。このときの補修レベルの候補値は 4.0, 3.5, 3.0, 2.5 の 4 種, 点検間隔も同様に 2 年～9 年の 8 種とした。小規模橋梁は一般的に積極な補修対象とならないため健全度制約を 1.5 と設定している。小規模橋梁を対象とした最適化計算では予算制約が各年度で異なり柔軟な対応が求められる。このことから初期点検年 sy_i を設計変数とした。総費用の凹凸の改善を目的とし、初期点検年の候補値は通常橋梁および優先橋梁の健全度制約の猶予期間が終了する 11 年目～27 年目とした。このため、計画 27 年目まではすべての小規模橋梁に対して 1 回目の点検および補修が行われているわけではない。このことから、小規模橋梁の健全度制約は初期点検年の期間が終わり、すべての小規模橋梁に対して何らかの対策がなされた計画 28 年目より適用されるものとした。

3. 既計算の格納による GA の計算の効率化

維持管理計画の策定において対象となる橋梁数は管理者によって異なる。実務的には、300橋あるいはそれ以上の橋梁群の最適化を行うことが必要となる。しかし、多数の橋梁に対して現実性の高い計算を行う場合、LCC の計算における組合せ数が増加し膨大な計算時間を要し実務への適用が困難となる。最適化計算において何らかの対応が必要となる。本研究における、目的関数の値と解析回数との関係の一例を図-2に示す。図において示す目的関数は対象橋梁の維持管理費用の総和である。このため、図中の横軸においては左側の解ほど優良な解を示し、軸の左端の値は最適解である。このようにGAでは多くの繰り返し計算を行い莫大な探索領域の中から優良な解を求める。一方、繰り返し計算のほとんどは最適解の近傍に集中し複数回の同じ計算が行われる。

このことから、本研究では GA 計算のテクニックとして、ある設計変数の組合せに対する解析結果を最初は空のデータベースに格納し、次回以降同じ組合せに対する計算は、格納されている値を用いるという手法を取り入れた。このことにより図-2 に示す膨大な回数においても同じ組合せの計算が必要なのは 1 度のみなので、図中に示した計算回数のほとんどが省力化できる。計算時間においても、GA によって生成される設計変数の組合せに対して毎回 LCC の計算を行う場合に比べて、約 1/100 の時間で同精度の解を得ることができた⁵⁾。

4. 計算結果

ここでは維持管理区分別の対象橋梁を通常橋梁330橋、優先橋梁を20橋、小規模橋梁を100橋の合計450橋を対象とした最適維持管理計画の策定を行う。ここで対象とする橋梁は建設部の管理する実橋梁を用いている。

はじめに定式化において示したように通常橋梁および優先橋梁を対象とした計算をおこなった。しかし、図-3に示したように初期以後の十数年間にわたり年度費用に凹凸がある期間が生じた。図においての青は年度費用、破線は予算制約、黄が小規模橋梁の維持管理において発生した年度費用である。また、最適化の結果を図-4、図-5、図-6に示す。これらにおいては横軸に年度、縦軸に健全度を表記している。図-4では20橋の優先橋梁

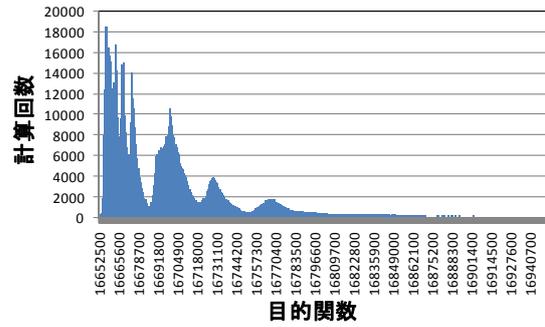


図-2 GAによる計算結果の例

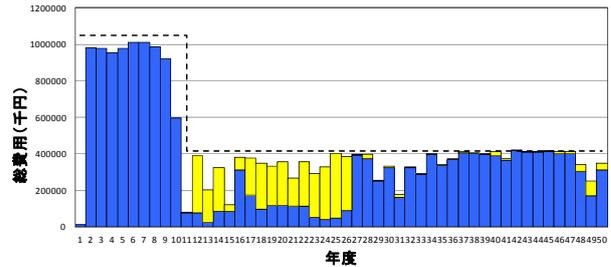


図-3 年度費用の推移

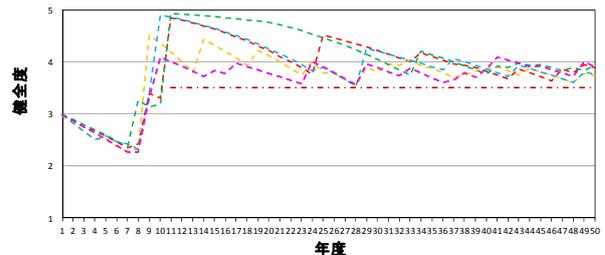


図-4 優先橋梁の健全度の最悪値の推移

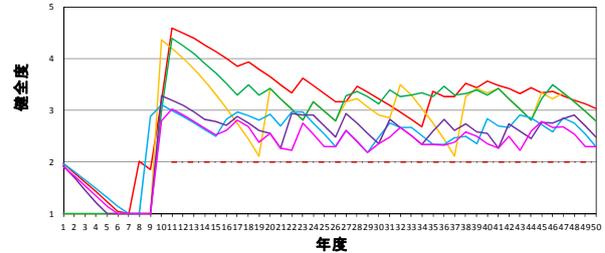


図-5 通常橋梁の健全度の最悪値の推移

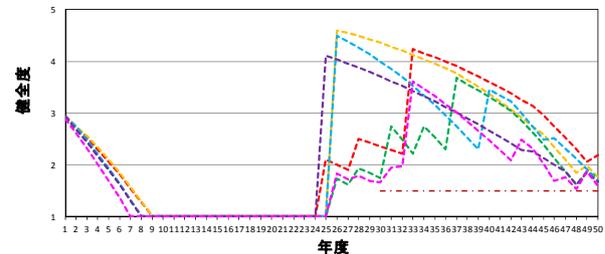


図-6 小規模橋梁の健全度の最悪値の推移

の健全度の最悪値の推移を、図-5では330橋の通常橋梁の健全度の最悪値の推移を、図-6では100橋の小規模橋梁の健全度の最悪値の推移を示している。

図-3からもわかるように、通常橋梁および優先橋梁の最適化の結果に小規模橋梁の維持管理において発生し

た費用を重ね合せた結果をみると、初期終了後に発生していた総費用の凹凸を充填することができ、年度費用のばらつきが改善されている。通常のBMSを適用させる橋梁に対する維持管理の最適化を行った結果を利用し、独立した最適化において小規模橋梁の維持管理問題を行うことによって、通常は維持管理計画の対象とされない規模の橋梁の計画的な維持管理を行うことができる。また、小規模橋梁の維持管理を併用することで、総費用のばらつきの改善が可能となる。実務でも地方の管理者が管理する橋梁の多くが小規模橋梁であることも少なくない中、計画の策定に対して有効な手法と考えられる。

それぞれの維持管理区分における総費用および設計変数を表-1に示す。LCCの合計に着目する。通常橋梁と優先橋梁の合計は184億8450万円である。このときの追加的に行った小規模橋梁の最適化の結果では計画期間内のLCCの合計は36億2670万円となった。両者を加えると、全維持管理区分のLCCの合計は221億1120万円となり、1橋当りの年度費用は約100万円となる。この値は実際に維持管理計画の策定を行っている管理者の予算と比較しても、この値はおおよそ実現可能な値だと考えられる。通常のBMSを適用した橋梁に関してはどの部材グループにおいても補修レベル3.5以上といった予防保全型の計画を選択している。また、優先橋梁ではすべての部材グループに対して補修レベル4.0と高い水準の計画が適応されている。一方、小規模橋梁のすべての部材グループにおいて、補修レベルは2.5を選択しており事後保全型の計画が選択されている。

表-1 各維持管理区分の総費用と設計変数の比較

		通常橋梁	優先橋梁	小規模橋梁
橋梁数		330	20	100
目的関数		184億8450万円		36億2670万円
補修レベル (健全度)	G1	3.5	4.0	2.5
	G2	4.0	4.0	2.5
	G3	4.0	4.0	2.5
点検間隔 (橋梁数)	2年	13	0	0
	3年	13	2	1
	4年	39	3	10
	5年	46	5	5
	6年	39	3	7
	7年	43	1	10
	8年	93	5	36
	9年	44	1	31

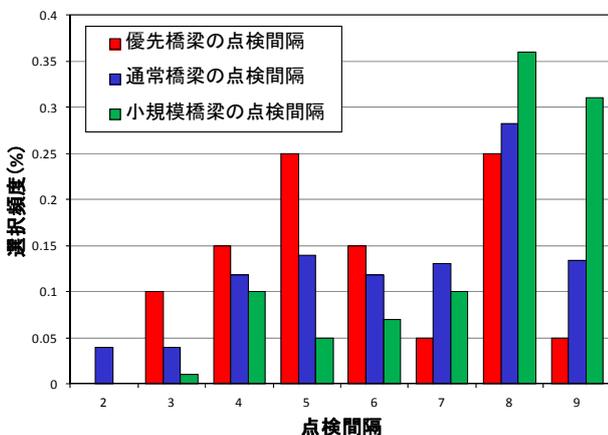


図-7 維持管理区分別の点検間隔の選択頻度

それぞれの結果は、一般的に行われている維持管理計画の策定における基本的な概念と相違ないものである。このことから、本研究におけるGAを用いた維持管理計画の最適化は実際の問題に則した計画の策定が可能であり、実務における計画策定に関しての何らかの指標として利用することが可能だと考えられる。

それぞれの点検間隔を比較する。維持管理区分別の点検間隔の選択頻度を図-7に示す。図において縦軸には選択された点検間隔の割合を示している。通常橋梁および小規模橋梁に関しては対象橋梁の大部分が5年以上の点検間隔を選択している。特に点検間隔8年および9年が多く選択されている。このことから、実務においては点検間隔を5年とするのが一般とされているが、長い点検間隔を選択するほうがLCCの最小化に有利だと考えられる。また、優先橋梁の点検間隔は各年にばらついてはいるが、5年付近および8年の間隔が多く選択されており、必ずしも短い点検間隔を採用する必要があるという結果ではない。他の維持管理区分の橋梁と比較すると点検実施については慎重な判断が必要と考えられる。

5. まとめ

本研究では実務において一般的に行われている維持管理区分の設定を考慮し優先橋梁、通常橋梁、小規模橋梁の3種の区分を設け、合計450橋を対象とした橋梁維持管理計画の最適化を行った。通常橋梁と優先橋梁においてはそれぞれの維持管理区分に対する制約条件を設定することによりそれぞれの維持管理水準を満足する結果を得られた。また、通常橋梁と優先橋梁の計算における総費用の凹凸を追加的に小規模橋梁の最適化を行うことにより、総費用のばらつきを改善した結果を示した。

また通常橋梁および優先橋梁350橋と小規模橋梁100橋の多数の橋梁を対象とした最適計画の結果を得られたことから、実務への適用の可能性を示したと考えられる。

点検間隔は一般には5年とされているのに対し、通常橋梁および小規模橋梁においては長めの間隔を選択することが有利であることを示した。優先橋梁の結果は分散したため選択には慎重な判断が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 杉本博之、鹿注麗：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.
- 2) 澁谷直隆、杉本博之、谷祐一郎：実際の補修工事実績を参照する橋梁補修コストモデルの再構築、土木学会第67回年次学術講演会, 2012.
- 3) 澁谷直隆、杉本博之、谷祐一郎：橋梁維持管理モデルの改良と最適化計算について、土木学会北海道支部 平成23年度年次技術研究発表会, A-6, 2012-2.
- 4) 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, 2011.
- 5) 澁谷直隆、杉本博之：GAによる橋梁維持管理計画最適化と考察、土木学会第67回年次学術講演会 I-180, 2012.