

橋梁の維持補修計画における初期の投資について

On an Investment during Initial Step of Bridge Management Process

北海学園大学大学院工学研究科 〇正 員 齋藤善之 (Yoshiyuki Saito)
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

北海道内の多くの市町村において、橋梁の点検及び今後の維持補修計画の策定が進められている。一般的に、海に面しない内陸部の市町村の橋梁は比較的良好な状態であるのに対し、日本海に面する市町村の橋梁は、かなり劣化が進行している。また、財務状態もそれぞれ異なり、維持補修計画の策定においても難しい点があるようである。中長期的には、少なくとも日常のパトロールあるいは定期点検等は市町村の職員によってされるべきように思われるが、技術者のいない場合もあり、市町村間の協力体制の確立など、今後の課題は山積している。

本研究は、維持補修計画の最適化についていくつかの検討を加えるものである。既に、最適化手法の応用に関するいくつかの考察、あるいは、点検結果のばらつきを考慮する最適維持補修計画を求め、確定論的な維持補修計画との比較を試みた¹⁾²⁾。

維持補修計画は、本来は、予防保全が最適であり、LCC 最小化に直結することは論をまたないであろう。自分の身近な環境を考えれば、錆につながるような電気器具の汚れはすぐふき取るし、腐食につながるような木造の建物の水溜りはすぐ拭き取る、等々である。同じ発想で、同じレベルの労力を橋梁のみならず多くの公共構造物に払うべきように思われる。

しかし、現実とは異なり、基本的に財務状態の悪化のため、予防保全が良いと分かっているにもかかわらずその状態に移行できないのが現実である。理由は、維持補修計画を始めるために点検をした結果、予想以上に橋梁あるいは部材の状態が悪い場合が多いためである。そのため、維持補修計画の初期に一部の橋梁に集中的に予算を投資せざるを得ず、他の橋梁が放置され、その結果他の橋梁の劣化が進行し、なかなか予防保全の状態に移行できないというわけである。

その解決策としては、維持補修計画の初期に投資を集中し、状態の悪い橋梁、あるいは部材を出来るだけ早く健全な状態にするという方法が考えられる。しかし、やみくもに多額の投資をすればよいというわけではなく、やはり、中長期的な LCC 最小化の中で初期投資を考えるべきである。

本報告では、以上の観点のもとに、従来から検討している最適化手法をこの種の問題に応用し、2つの地方公共団体の点検結果を用いて、LCC 最小化のもとで初期投資をどの程度の額にすればよいか、あるいは何年間大規模の初期投資をすればよいかなどについて考察を加える。また、これらは、確定論的に扱う場合と点検のばら

つきを考慮する確率論的な立場それぞれで計算し両者を比較し、検討を加えるものである。

2. 橋梁劣化の現状と初期投資について

2.1 北海道の橋梁点検

北海道建設部では、管轄する橋梁に対して5年に一度遠望目視による定期点検が行われており、平成21年度現在では2巡目点検を実施している。北海道の橋梁点検では、各径間の部材ごとに劣化状況が5段階の健全度で評価されており、5が健全、1が最も劣化した状態を表す³⁾。よって各々の橋梁において各部材の点検結果は径間数分存在するが、本論文ではそれらの平均値を算定し、各橋梁における各部材の点検結果の代表値として用いた。

定期点検の対象部材のうち、本論文では橋梁を構成する部材を床版、主桁、躯体、伸縮装置、支承、橋面工の6部材とした。ここで、基礎を含まなかったのは、基礎の点検結果の9割は5と評価されており、残りの点検データで劣化曲線を作るにはデータ数が少ないこと、および、補修の事例が少なく適切な補修コストモデルを構築できなかったためである。

2.2 初期投資

BMS は一般的に、中長期における総費用が最小となるような維持補修戦略を打ち出すものである。近年における BMS を対象とした研究の多く、および筆者らが過去に行った研究¹⁾²⁾では、中長期的観点から考えると総費用を抑えるためには予防保全型の戦略が効果的であるという結果が得られている。これは、劣化が進むにつれ、その部材を健全な状態にするために要する補修費は爆発的に増加するのが大きな要因である。よって、劣化の初期段階で補修を行う予防保全型の維持補修では、補修の回数は増えるものの、トータルでは総費用を少なく抑えることができる。

こういった知見から、管理者における橋梁の維持補修は今後予防保全型のものに移行していくものと思われる。しかし、管理している橋梁の中には既にかなり劣化が進行している橋梁が少なからず存在する。図-1に北海道の橋梁における健全度の分布図を示す。図は2巡目の点検結果における健全度を集計しその割合を求めたものであり、横軸は健全度、縦軸はその割合を表す。図に示したように、北海道が管理する橋梁では全体の2割近くの部材が健全度3未満と劣化が進行している状態となっている。これは北海道では事後保全的な、つまり劣化が顕在化してから補修を行っていたためと考えられる。必ずしも管理する全ての橋梁に対して予防保全型の維持補修

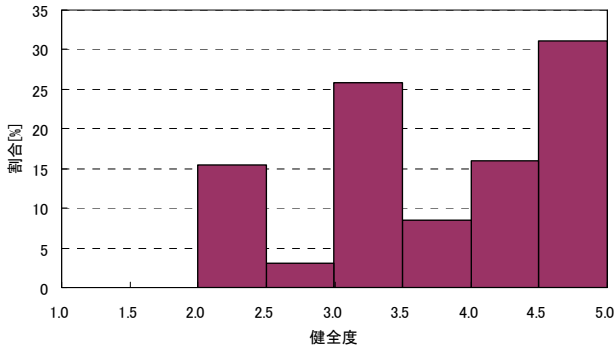


図-1 点検結果における健全度の分布

を行うものではないが、既に劣化している橋梁に対して予防保全型の維持補修を適用する場合、出来るだけ早くその橋梁を健全な状態にする必要がある。よって予防保全型の計画の開始時には多目の初期投資が必要となることが考えられるが、管理者側では一般的に年度予算の平準化が求められる。本研究はこういった問題において、総費用を低く抑え、かつ計画初期とそれ以降の年度予算の差が小さくなるような予算の設定を試みるものである。本論文では基礎段階として、予算制約を行わない最適化から得られる最適補修計画における年度費用の推移やどのくらいの初期投資が必要となるかを確認する。なお、最適化は確定論的および確率論的問題のそれぞれにおいて行い、両者の比較を行う。

3. 最適化について

ここでは、LCC 最小化に基づく最適化問題について説明する。前記のように、本論文では確定論的問題および確率論的問題の両方において、最適化を行う。ここで、確定論的問題とは各部材の劣化モデルがただ1本の劣化曲線によって表されたモデルを用いる問題であり、確率論的問題とは各部材の劣化モデルが生起確率を持った複数の劣化曲線によって表されたモデルを用いる問題を指す。確定論的問題および確率論的問題それぞれの劣化モデルの作成については参考文献 1)および 2)を参考されたい。以下にそれぞれの最適設計問題について述べる。

3.1 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。

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

制約条件:

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

$$g(NY+i) = 2 - R_i^{\min} \leq 0 \quad (i=1 \sim NB) \quad (3)$$

$$\text{設計変数: 補修レベル } h_i \quad (i=1 \sim NB) \quad (4)$$

$$\text{点検間隔 } s_i \quad (i=1 \sim NB) \quad (5)$$

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。ここで、補修レベルとは点検を行った際に補修実行の判断基準となる値であり、点検時の健全度が h_i 以下であった場合に補修を行う。また、点検間隔とはその名の通り、点検を行う間隔年を表す。

橋梁 i において y 年度に発生する総費用 C_{iy} は式(6)から算定される。

$$C_{iy} = \sum_{j=1}^{NM} c_{ijy}^R + c_{iy}^E \quad (i=1 \sim NB, y=1 \sim NY) \quad (6)$$

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

また、計画の初期10年は、健全度制約の猶予期間とし、その期間内はレベルを下げた補修を行うことにより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。

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の40%とした。

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、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。

3.2 確率論的問題

確率論的問題では、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。

$$\text{目的関数: } OBJ = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{y=1}^{NY} C_{iy} \rightarrow \min \quad (7)$$

制約条件:

$$g(y) = \sum_{i=1}^{NB} C_{iy} - B_y \leq 0 \quad (y=1 \sim NY) \quad (8)$$

$$g(NY+i) = P_i^{\max} - P_a \leq 0 \quad (i=1 \sim NB) \quad (9)$$

$$\text{設計変数: 補修レベル } h_i \quad (i=1 \sim NB) \quad (10)$$

$$\text{点検間隔 } s_i \quad (i=1 \sim NB) \quad (11)$$

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年目以降のライフサイクル期間にお

— 床版 — 主桁 — 躯体 — 伸縮装置 — 支承 — 橋面工

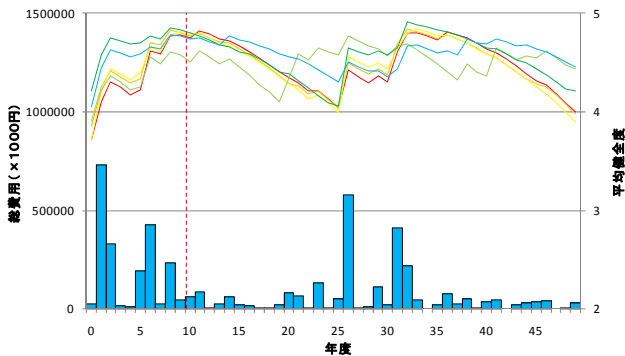


図-2 確定論 グループ A

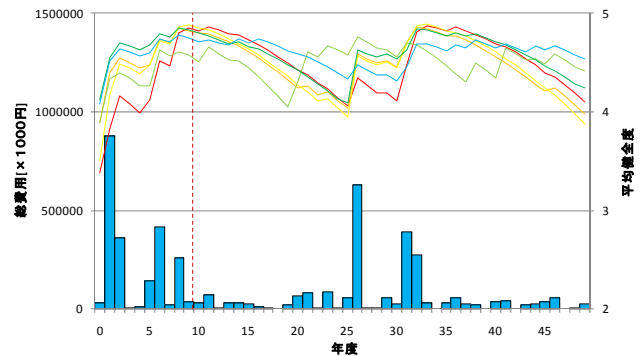


図-3 確定論 グループ B

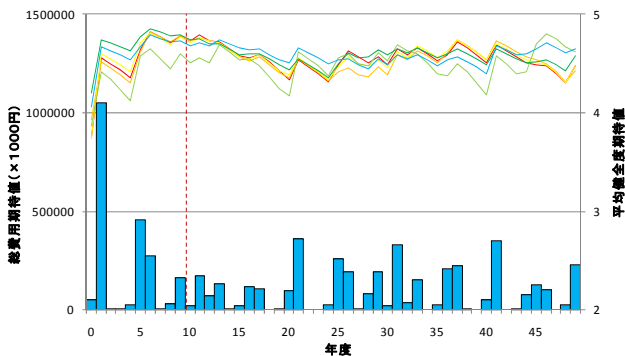


図-4 確率論 グループ A

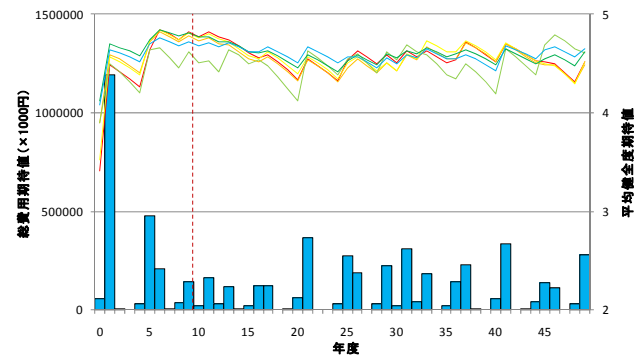


図-5 確率論 グループ B

いて健全度が 2 を下回る確率の最大値, P_a は健全度が 2 を下回る確率の制約値, 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(12)から算定される。

$$C_{iy} = \sum_{n=1}^N P_n^* \left(\sum_{j=1}^{NM} c_{nij}^R + c_{nij}^E \right) \quad (i=1 \sim NB, y=1 \sim NY) \quad (12)$$

ここで, N は総試行回数, P_n^* は n 回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, 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, NM は部材数($NM=6$)を表す。

N 回目の劣化曲線の組み合わせの生起確率 P_n^* は式(13)から算定される。

$$P_n^* = \prod_{j=1}^{NM} P_{m_{nj}} \quad (n=1 \sim N) \quad (13)$$

ここで, m_{nj} は n 回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 年においては, 確定論的問題と同様, 健全度制約の猶予期間とし, レベルを下げた補修を行う。

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. 数値計算例

ここでは, 3. で述べた確定論的問題, 確率論的問題の 2 種の最適化問題において, 実際に計算を行った例を示す。計算対象は, 道内のある地方公共団体に属する橋梁の集合であるグループ A (170 橋) およびグループ B (180 橋) の 2 つの橋梁群を対象とした。なお, いずれの問題においても年度予算 B_y の値は十分大きな値を設定して, 予算制約に関しては実質的に無制約な状態で最適化を行っている。設計変数の候補値は補修レベルを 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 の 4 種類, 点検間隔[年]を 4~11 の 8 種類とした。またライフサイクル期間を 50 年とし, 最適化には GA⁴⁾を用いる。GA のパラメータは人口サイズ 500, 交叉法は 20 点交叉とし, 交叉確率 80%, 突然変異確率 5%, 大変異回数 20 回とし, 最大繰返し回数 20000 回に達するか, 最良解が占める人口の割合が 10% を超えたときに計算を終了している。

各グループを対象とした確定論, 確率論の両問題において得られた最適解における総費用(期待値)および健全度(期待値)の推移を図-2~図-6 にそれぞれ示す。図は横軸が年度, 棒グラフと左の縦軸が総費用(期待値), 折れ線グラフと右の縦軸が各部材の平均健全度(期待値)を示す。各色の折れ線がどの部材に対応するかは, 本ページ最上部に示した凡例の通りである。なお図中の赤色の破線は, レベルを下げた補修を行う境目(=10 年目)を表している。

ライフサイクル期間内に発生する総費用(期待値)は, 確定論ではグループ A で 45 億 1395 万円, グループ B で

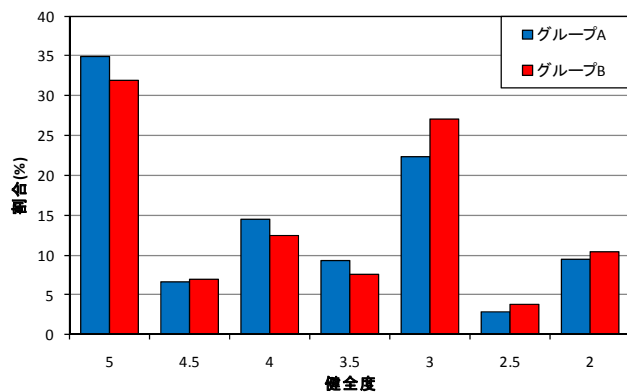


図-7 各橋梁グループにおける健全度の分布

44 億 8287 万円，確率論ではグループ A で 58 億 9354 万円，グループ B で 58 億 8974 万円となった。

図をそれぞれ比較すると，いずれの場合でも 2 年目に発生する費用（期待値）つまり 1 年目の点検結果を受けて行われた補修に伴って発生する費用が最大となっており，グループ A では確定論で 7 億 3312 万円，確率論で 10 億 4992 万円となり，グループ B では確定論で 8 億 7716 万円，確率論で 11 億 9188 万円となる。2 年目に発生する費用（期待値）のライフサイクル期間内に発生する総費用（期待値）に対する割合は，いずれの場合でも 15% 以上と非常に大きな値となる。これは，2. で説明したように，対象とする橋梁群における既に劣化した橋梁を補修するためであり，予防保全型の計画を行うためには一定の年度予算を設定することは効果的ではないと考えられる。むしろ総費用（期待値）を抑制するためには，計画の初期に多目の費用を投入して劣化した橋梁を補修し，予防保全型の補修計画に移行していくことが効果的であると考えられる。ただし，3. で述べたように初期の 10 年間はレベルを下げた補修を行っているにも関わらず，初期の費用が大きな値を示していることから，初期における補修では劣化した橋梁を完璧に補修するのではなく，必要に応じてレベルを下げた補修を行い，次第に橋梁群の健全度の水準を上げていながら予防保全型の維持補修計画に移行していくのが良いと考える。

得られた解について 2 つの橋梁群（グループ A およびグループ B）で比較を行う。2 年目に発生する費用（期待値）に着目すると，確定論および確率論のどちらでも 2 年目に発生する費用（期待値）はグループ B の方が大きな値となっている。これは図-7 に示すように，グループ B の方が若干劣化した橋梁の割合が大きいためであると考えられる。このように初期に発生する費用（期待値）は，劣化した橋梁の数に依存し，劣化した橋梁が多くなるほど初期に発生する費用（期待値）が大きくなるため，管理する橋梁群が劣化すると，初期の予算はより多く必要となる結果が得られた。

続いて，それぞれのグループにおいて確定論と確率論の総費用（期待値）を比較すると，グループ A およびグループ B のどちらにおいても確率論の方が約 30% 大きくなっており，2 年目に発生する費用（期待値）を比較すると確率論の方が約 40% 大きな値となっている。本研究で扱っている確率論とは，実際に行われた点検結

果のばらつきを LCC 計算において考慮することであり，実際に発生する費用は確定論の値よりも確率論で求めた値の方が近いと考えられる。そのため，もし確定論の最適化によって年度予算を決定した場合，実際に必要となる費用は予算を大きく超過してしまい，計画が破たんしてしまうことが考えられる。こういった事態を避けるためにも，補修計画策定の際には確率論的な観点の下で行っていくことが必要であると考えられる。

5. まとめ

高度成長期に建造した橋梁の多くが更新時期を迎え始め，維持補修における問題が年々重要性を増してきている。維持補修の重要性に比例するように，維持補修に関する研究も多く発表されており，その多くで予防保全型の維持補修が効果的であると述べられている。しかし予防保全型の維持補修を適用するには，対象とする橋梁が健全な状態でなくてはならず，既に劣化している橋梁は先に補修を行わなくてはならない。そのため，予防保全型の維持補修を行うためには，計画初期に多目の予算を要するものと考えられる。しかし一般に予算の年度間の差は出来るだけ小さくし，平準化することが求められる。

本研究はそういった背景の下，劣化過程をただ一通りとした確定論，および点検結果のばらつきを考慮して複数の劣化過程を考えた確率論の両観点の下で，LCC 最小化に基づく最適化を行い，年度間の差が少なく，かつ LCC を低く抑えるような予算の設定を試みた。本論文ではその第一歩として，予算による制約を一切行わずに最適化を行い，得られる解の傾向を確認・考察した。その結果，全体で発生する総費用（期待値）の内，約 15% が計画 2 年目に発生するという結果が得られ，効果的な維持補修を行うためには計画の初期に多目の費用を要することを確認した。また，確率論では確定論に比べ約 30% 総費用が大きくなる結果となった。確率論は実際に行われた点検結果のばらつきを反映した問題であることから，実際に要する費用は確定論から得られる値より大きくなることが考えられるため，確率論的観点の下で最適化を行う必要性が考えられる。

本論文の計算では予算制約は行っていないが，今後予算制約を行った計算を試みる上で，その傾向を見るのは有用であると考えられる。今後は様々な予算設定の下で計算を行い，効果的な予算設定を試みたいと考える。

参考文献

- 1) 齋藤，木内，杉本：劣化進行の不確実性を考慮した橋梁の最適補修計画について，木学会北海道支部論文報告集 第 66 号，A-39，2010.
- 2) 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.
- 3) 北海道建設部：公共土木施設長寿命化検討委員会報告書，2006.
- 4) 鹿汴麗：遺伝的アルゴリズムの工業設計への応用に関する研究，平成 8 年度室蘭工業大学大学院博士論文，1997.