

## 橋梁維持管理計画モデルの改良と最適化計算について

On improvement of bridge management model and optimization calculation

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)  
北海学園大学工学部社会環境工学科      谷佑一郎 (Yuichiro Tani)

## 1. まえがき

現在、多くの市町村において、橋梁の長寿命化計画の策定が行われている。骨格となる計画は得られているが、そのまま実施することはできないため、予算制約の中で多数の橋梁の補修順位決定という問題を、試行錯誤的に行っているのが実情である。市町村間で、予算の状況、各橋梁部材の健全度などはバラバラであり、予算制約が厳しく、橋梁の状態が悪い場合などは、かなり難しい作業を強いられることになる。この計画策定に際して、理論的な過程により、何らかの基本的な考え方が提起されていけば、作業も楽になると思われるが、現状では、それは提起されていないと考えざるを得ない。自然災害に対する備えとしても、社会基盤施設の整備は喫緊の課題と思われる。

ニューヨーク市の B. Yanev は橋梁維持管理に関する著書を著した。<sup>1)</sup> この著書の中で、「Optimization (最適化)」という言葉が随所に出てくる。「最適化」は概念的に使われる場合と、設計解を求める数理的な手法として使われる場合とがある。橋梁維持管理には多くの意思決定が求められるが、ほとんどの意思決定の問題は、「最適化問題」として定式化が可能である。

筆者らはすでに、点検結果のばらつきを考慮した確率的最適維持管理計画を発表し<sup>2) 3)</sup>、現状の点検結果のばらつきの下では、予想されている LCC より、30～40%増加することを示した。ここでは、橋梁数は 300 橋扱ったが、計算時間短縮のため、考えられるすべての組み合わせの計算を事前にしておきデータベースとして用意することにより、最適化に要する計算時間をかなり少なくすることができた。

この時部材は、主桁、床版、躯体、伸縮装置、支承、橋面工の 6 部材として問題を設定した。しかし、床版 1 つとってみても、損傷としては、ひび割れ、遊離石灰、断面欠損などがあり、本来、劣化曲線はそれぞれ異なり、補修工法、補修費も異なる。従来は、モデル化の過程で、劣化曲線と補修費の計算はそれぞれ 1 本としてきたが、LCC の精度を上げるためには、モデル化の精度をより現実に近い必要はあると思われる。

本研究では、このモデル化を現実に近い近づけることをまず試みる。この場合、部材劣化曲線が従来よりもかなり多くなることが想定され、それらの組み合わせ数も多くなり、事前にすべての組み合わせの計算をデータベース化することは、計算手法として現実的ではなくなる。そこで、GA (遺伝的アルゴリズム) の計算において用い

られるテクニックとして、最適化の計算をしながら、あるパラメータの組み合わ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、計算過程で利用する手法を取り入れる。さらに、このデータベースを保存しておいて、次に GA パラメータを変えて行う計算に利用すれば、結局事前計算によりデータベースを用意するのと同じ効果を期待することができる。

これらについて、以下順に説明していく。

## 2. 橋梁維持管理計画モデルの改良について

まず初めに、本論文ではより現実性の高い LCC の計算のために、ある地方自治体の建設部 (以下、建設部と略する) が管理する橋梁のうち 2010 年度に補修工事が行われた橋梁の資料および定期点検の結果を用いて統計処理を行い、各健全度に対応する補修費用を算出するコストモデルを作成した。これらのコストモデルは橋梁を構成する部材それぞれの補修工法に対応する必要がある。しかし、部材の中には代表する補修工法が複数あるものもある。このような部材においては必ずしも部材とコストモデルが一对一の対応になるわけではない。こうした部材に対してはそれぞれの補修工法に対するコストモデルを作成することで精度の向上を試みた。

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。また主桁は鋼橋とコンクリート橋の 2 材種間で補修内容が大きく異なるため、それぞれに対応するコストモデルを作成した。主桁以外の部材においても同様に鋼橋とコンクリート橋それぞれのコストモデルの作成を試みたが、補修工法およびその補修単価、補修領域に際立った差異がみられなかった。そのため材種間での統一したコストモデルを使用するものとした。なお参照した資料は H22 年度補修工事資料に含まれる「実施設計書」、「体系数量集計表」、「図面集」また「点検調査原票」である。ここで作成した部材、点検項目ごとのコストモデルとそのコストモデルに対応する損傷の関係を表-1 に示す。

本研究では従来、橋梁を構成する各部材に対してその部材における点検項目それぞれの評価の最悪値を使用し作成した、その部材を代表する劣化曲線を使用し LCC の計算を行っていた。しかし表-1 でも示したとおり、

表－1 コストモデルと損傷の対応

| 部材              | コスト算出      | 対応する損傷                            |
|-----------------|------------|-----------------------------------|
| 床版              | ひび割れ及び橋面防水 | ひび割れ                              |
|                 | 断面修復       | 剥離・鉄筋露出<br>豆板・空洞<br>抜け落ち          |
| 主桁(鋼橋)          | 塗装         | その部材の全て                           |
| 主桁<br>(コンクリート橋) | ひび割れ補修     | ひび割れ                              |
|                 | 断面修復       | 剥離・鉄筋露出<br>豆板・空洞<br>欠損            |
| 躯体              | ひび割れ補修     | ひび割れ                              |
|                 | 断面修復       | 剥離・鉄筋露出<br>豆板・空洞<br>すりへり・浸食<br>欠損 |
| 伸縮装置            | 取り替え       | その部材の全て                           |
| 支<br>承          | 本体         | その部材の全て                           |
|                 | 沓座モルタル     |                                   |
|                 | アンカーボルト    |                                   |
| 橋<br>面<br>工     | 舗装         | 舗装打替え                             |
|                 | 地覆         | 地覆補修                              |
|                 | 縁石         | 縁石取り替え                            |
|                 | 防護柵        | 塗装もしくは取り替え                        |

コストモデルの細分化に伴い、例えばコンクリート製の部材に対しては、ひび割れ補修に対応する評価と断面修復に対応する評価のコストモデルを作成したことにより、それぞれの評価に対応する劣化曲線を与えることが必要となる。それらの詳細を表－2 に示す。

実際のコスト算出は2つの表を対応させて行う。例えばコンクリート橋主桁のひび割れに対応した健全度（劣化度）は表－2 を用いてその予測値を算出し、補修を行うのであればその補修費用を表－1 におけるコンクリート橋主桁のひび割れ補修のコストモデルより計算する。

劣化曲線は以下の式を用いている。

$$r(t) = 5 - 4 \left( \frac{t}{T} \right)^2 \quad (0 \leq t \leq T) \quad (1a)$$

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

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る。

劣化曲線は以下の考え方で作成される。

建設部では管理する 5000 以上の橋梁に対して 2000～2005 年に 1 巡目、2006～2010 年に 2 巡目の定期点検を行っている。本論文においては 1 巡目の点検結果を用いて作成した各橋梁を構成する部材、損傷ごとの基本的な劣化曲線を 2 巡目の点検結果を用いて補正し個々の橋梁、部材、損傷ごとの劣化曲線とすることにより、橋梁ごとの点検結果および劣化のばらつきを考慮した現実的な精度の高い LCC の計算を試みる。

表－2 コストモデルと対応した劣化曲線

| 部材          | 必要な劣化曲線                                        |
|-------------|------------------------------------------------|
| 床版          | ひび割れの劣化曲線                                      |
|             | 剥離・鉄筋露出<br>豆板・空洞<br>抜け落ち } の最悪値での劣化曲線          |
| 主桁(鋼橋)      | 点検項目の最悪値を用いた劣化曲線                               |
| 主桁(コンクリート橋) | ひび割れの劣化曲線                                      |
|             | 剥離・鉄筋露出<br>豆板・空洞<br>欠損 } の最悪値での劣化曲線            |
| 躯体          | ひび割れの劣化曲線                                      |
|             | 剥離・鉄筋露出<br>豆板・空洞<br>すりへり・浸食<br>欠損 } の最悪値での劣化曲線 |
| 伸縮装置        | 点検項目の最悪値を用いた劣化曲線                               |
| 支承          | 点検項目の最悪値を用いた劣化曲線                               |
| 橋面工         | 舗装                                             |
|             | 地覆                                             |
|             | 縁石                                             |
|             | 防護柵                                            |

例として 1 径間の橋梁に対して従来のモデルとの劣化曲線数の比較を行う。従来は前述のとおり主桁、床版、躯体、伸縮装置、支承、橋面工それぞれに対して 1 本の劣化曲線を与える必要があったため 6 本の劣化曲線が必要であった。本論文で作成したコストモデルに対応させるためのモデルでは、表－2 のように部材、点検項目ごとに劣化曲線を与える必要があるため、床版、コンクリート橋の主桁、躯体ではひび割れ補修、断面修復に対応する劣化曲線が必要になる。また橋面工に関しては舗装、防護柵、地覆、縁石それぞれに対応する劣化曲線を与える必要がある。また、部材ごとの LCC の計算を行うことから躯体、伸縮装置、支承は端部にそれぞれ 1 つずつあり健全度も独立しているため別々に劣化曲線を与えなくてはならない。これらの劣化曲線の本数を集計すると本論文で作成したコストモデルに対応する LCC を計算するための劣化曲線の本数は鋼橋で 15 本、コンクリート橋で 16 本となり、1 径間の橋梁 1 橋を例にとったとしても必要な劣化曲線が増加することが分かる。

実際に、点検項目ごとの劣化曲線を作成するためには点検データのあるすべての橋梁の評価を使用するべきではあるが、本研究においては点検データの中で明確に劣化原因の示されたデータのみを用いて簡易的に各評価の劣化予測を行った。簡易的な劣化曲線はコストモデルを作成した部材、点検項目に対応する点検結果を用いて式 (1a)、(1b) より求められる各年度の健全度の予測値との二乗誤差を最小化することで作成した。

### 3. 最適化計算について

ここでは、橋梁の維持補修計画に対して LCC 最小化の概念の下に、年度予算および各部材の最小健全度を制約条件とした最適な補修計画の策定を試みる。

目的関数は対象とする全橋梁の LCC の合計とし最小化を目的とする。これは表－1 で示したコストモデルと

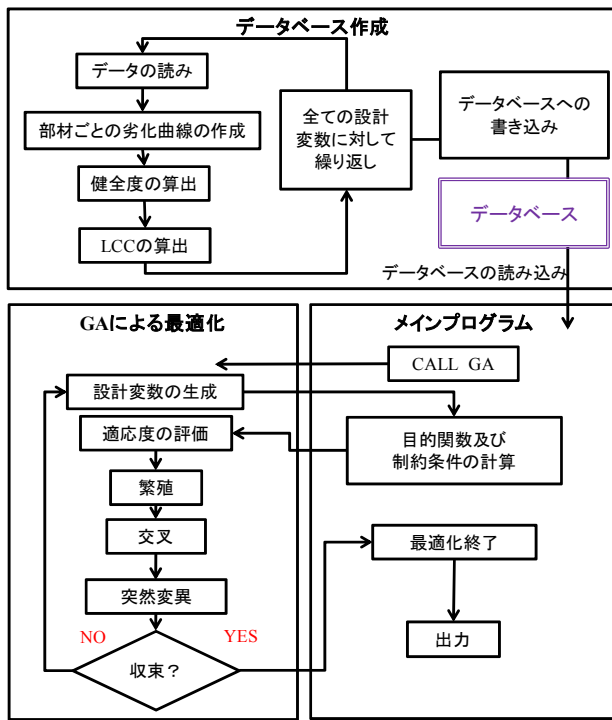


図-1 従来の計算過程の概念図

表-2 で示した劣化曲線をそれぞれ対応させることで 1 橋ごとに部材、点検項目ごとの費用が算出される。制約条件はその年度での総費用が年度予算を上回らないこととした。設計変数は補修レベル、初期点検年、点検間隔とした。補修レベルは離散型の実数値、初期点検年および点検間隔は整数値とする。ライフサイクル期間内において、橋梁ごとに初期点検年で 1 回目の点検を行われ、その後全橋梁で統一された点検間隔の間隔で全部材の点検を行い、健全度が補修レベル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。ここで、それぞれの設計変数の取り得る候補値は補修レベルは 4.0, 3.5, 3.0, 2.5, 初期点検年は 1~4 年、点検間隔は 4~11 年としている。

データベースを作成するにあたっては、各解析対象橋梁に対してそれぞれの部材の諸元データ、初期健全度、耐用年数の読み込み、補修シナリオの設定、各年度における健全度の算定、年度ごとの点検年および点検費用の算出、補修年および補修費用の算出が必要である。そして、その橋梁に対してライフサイクル期間内に発生する総費用の算出を行っているが、対応するモデル化の精度の向上を試みるにあたり、従来に比べ劣化曲線の量や設計変数の組み合わせがかなり増加する。このため事前に考えるすべての組み合わせの計算を行いデータベース化することは現実的でなくなる。仮に 1 径間の鋼橋 1 橋の場合のデータベース作成でもライフサイクル期間内における劣化曲線数 15 本、設計変数の組み合わせ 128 通りでの  $15 \times 128 = 1920$  回の計算を行わなくてはならない。

これに対応するため、まえがきでも述べたとおり事前に全ての組み合わせに対応するデータベースの作成を行うのではなく、初期の計算においては GA の計算の中で

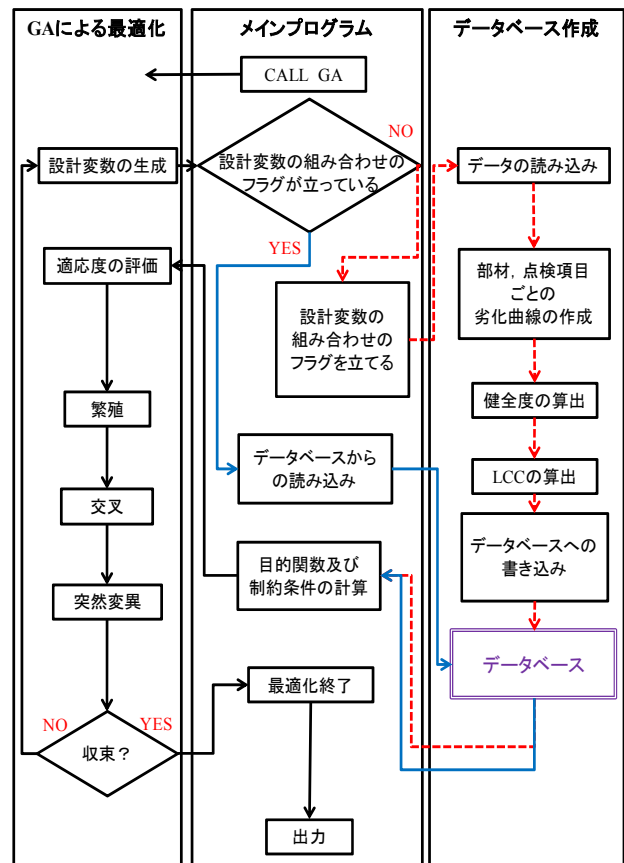


図-2 本論文での計算過程の概念図

算出された設計変数の組み合わせに対応する計算結果を空のデータベースに格納し、計算過程で用いる手法を取り入れる。このことにより事前に全ての組み合わせの計算を行わなくても最適化において必要とされた設計変数の組み合わせのみを計算し使用することができる。また、こうして最適化の計算と並行して作成された計算に必要なデータベースを、以後の GA のパラメータを変更して行う計算に用いることにより、あらかじめ事前計算を行い、データベースを作成した状態と同じ効果を得ることを期待する。ここで従来の計算過程の概念図を図-1、本研究での計算過程を図-2 に示し比較する。

#### 4. 数値計算例および考察

ここでは上記の最適設計問題に対して行った数値計算例を示す。本研究で用いたプログラムの計算時間や最適化の傾向について考察を加える。

解析対象橋梁は建設部が管理する鋼橋、コンクリート橋をそれぞれ 5 橋ずつ任意に選択した 10 橋とした。解析対象橋梁の諸元データや健全度の整理、検討に対する研究が不十分であるため、ここでは諸元や初期健全度などを簡易的な値として入力した。

ライフサイクル期間は 50 年、年度予算は 1 橋あたり 300 万円でライフサイクル期間内において一定とした。使用した 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 5、大変異回数を 20 回とし、最大世代数を 200 回とした。また同条件のもとで人口サイズを 100 とした場合と 200 とした場合の

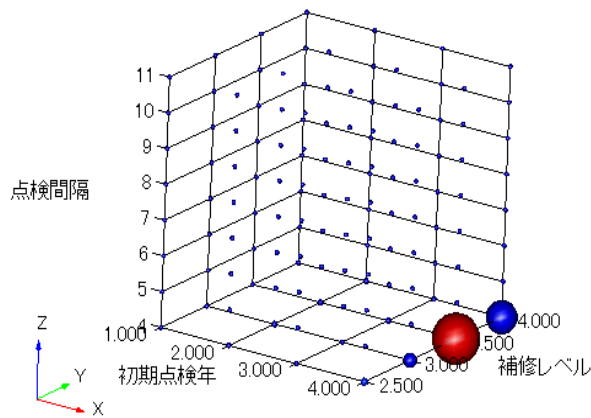


図-3 1 橋梁の GA による最適化における設計変数の組み合わせごとの選択頻度

比較を行う。

人口サイズを 100 とした場合の最適化における 1 橋の例の各設計変数の組み合わせの計算において選択された頻度を図-3 に示す。最適解は設計変数が補修レベルは 3.5, 初期点検年は 4 年, 点検間隔は 4 年となったとき, 目的関数の値は 1957.7 万円となった。また図中のバブルはそれぞれの設計変数の組み合わせを示し, バブルの大きさはその組み合わせが選択された回数を示す。赤で示したバブルは実際に最適解において選択された設計変数の組み合わせであり他の組み合わせと比較しても最適解とそれに近い設計変数の組み合わせに多くの計算回数が集中していることが分かる。この分布は自然選択と遺伝学をベースとし世代を更新するにつれて最適解へと選択が集約していく GA の特徴をよく表わしている。最適解の近傍のように多数回の選択されている組合せに対しては解析結果を空のデータベースに格納し, 計算の過程で利用していく手法が効果的に働くことが期待できる。

数値計算は, 与えられた設計変数に対して毎回 LCC 計算を行ったもの (以下, ①とする) とデータベースを作成しながら計算を行ったもの (以下, ②とする), ②で作成されたデータベースを使用し計算したもの (以下, ③とする) の 3 回を行い比較する。人口サイズ 100 および 200 における計算結果を表-3 に示す。表からもわかるように双方において①と②を比較すると, 大幅な時間の短縮が確認できる。これは②では一度計算された設計変数の組み合わせに対しては値をデータベースに格納するため同じ設計変数の組み合わせに対しては計算を省略し効率化を行っていることで合理的な計算がなされている結果を確認することができる。また②での結果と③での結果を比較すると計算時間は③に必要な時間が②と比べ短縮されている。これは③では②であらかじめ作成したデータベースを使用していることに起因し, ②によって期待していた事前計算によりデータベースを用意するのと同じ効果を発揮することを確認できる。人口サイズごとに 3 パターンのどの計算結果においても目的関数は同じ値であった。人口サイズを 100 とした場合と 200 とした場合を比較すると, 最終世代数の値から人口サイ

表-3 人口サイズによる目的関数と計算時間の比較

| 人口サイズ | 100        | 200        |
|-------|------------|------------|
| 最適解   | 1億8416.2万円 | 1億8347.8万円 |
| ①     | 23分36秒     | 24分19秒     |
| ②     | 20秒        | 21秒        |
| ③     | 3秒         | 3秒         |
| 最終世代数 | 150        | 77         |

ズが 200 の方が早期に収束していることが確認できる。また目的関数は人口サイズが 200 とした方が優良な解を算出した。これらのことと計算に要した時間の比較から本論文で取り扱った最適化では人口サイズが大きいものの方が効果的であると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では橋梁維持管理計画におけるモデル化の精度をより現実に近づけることを試みた。まず建設部が管理する橋梁の補修工事の資料および定期点検の結果を用いてより現実性の高いコストモデルを作成した。これに伴い部材劣化曲線がかなり多くなり従来の全ての組み合わせに対して事前計算を行う方法が現実的ではなくなる。そのため最適化の計算をしながら, ある設計変数の組み合わ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, 計算の過程で利用していく手法を取り入れ, それを用いて実際に簡易的に 10 橋に対して①, ②, および③の 3 パターンの計算を行った。それぞれの最適解の目的関数は一致する結果が得られた。また要した計算時間は②が①より, また③が②と比べ短縮された。このことから②での効率化と期待していた事前計算によりデータベースを用意するのと同じ効果を発揮することができたとことが確認できる。

データベースに途中で書き込むプロセスを加えることにより, GA の応用に関して精度及び効率を上げる道筋が示されたと思われる。

本論文ではそれぞれの部材の各要因の劣化曲線および諸元等は簡易的に与えたものでの計算を行ったが, 今後はデータの集計や整理を十分に行い実際の橋梁に対応する計算を行うとともに, 実務的に説得力のある橋梁維持管理の方向性を示すために, より多くの橋梁を対象とする研究を進めたいと考えている。

## 参考文献

- 1) Yanev, Bojidar. Bridge Management. John Wiley & Sons., 2007.
- 2) 木内順司, 齋藤善之, 杉本博之: 点検結果のばらつきを考慮した橋梁の最適維持管理計画に関する研究, 構造工学論文集 Vol.57A, pp.155-168, 2011.
- 3) 齋藤善之, 澁谷直隆, 杉本博之: 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, 北海学園大学, 工学部研究報告, 第 39 号, pp.1-36, 2004. (投稿中)