

遺伝的アルゴリズムによる橋梁群の 維持管理費用の均等化

天野 和洋, 大谷 芳輝

橋梁管理者である自治体の意思決定を支援するため、橋梁群全体の維持管理費用を定量的に評価し、中長期的な予測と予算制約下で効率的な対策を行うための橋梁マネジメントシステムを開発した。本稿は、同システムの一つの機能である予算計画の最適化、維持管理費用の均等化に対して、遺伝的アルゴリズム (GA) を適用した事例である。

キーワード：橋梁, アセット・マネジメント, 遺伝的アルゴリズム, 山積み・山崩し, 最適化

1. はじめに

現在、高度成長期後半に建設された橋梁の大量更新時代を迎えている。自治体は厳しい財政運営を迫られる一方で、将来にわたり橋梁を健全に維持して住民に安全・安心を提供していかねばならない。そこで、橋梁管理者である自治体の意思決定を支援するため、橋梁群全体の維持管理費用を定量的に評価し、中長期的な予測と予算制約下で効率的な対策を行うための橋梁マネジメントシステムを開発した。

システムは、橋梁諸元をはじめとした種々の情報を格納するデータベース群を根幹として、以下のサブシステムから構成されている。

- 橋梁の安全性を現場で確認し、維持管理に必要な情報を収集するための「点検調査支援システム」
- 点検結果から劣化予測を行って橋梁ごとの維持管理費用、すなわちライフサイクルコスト (LCC) を算定する「LCC 算定システム」
- 全橋梁の LCC を集計して予算計画の最適化を行う「中長期予算計画支援システム」
- 予算計画を基に対策工事リストを作成して中期事業計画に反映するための「中期事業計画支援システム」

本稿は、このうち3番目に記載した予算計画の最適化、維持管理費用の均等化に対して、遺伝的アルゴリズム (GA) を適用した事例である。

2. 維持管理費用の算出

2.1 橋梁の健全度評価

予算計画の基となる維持管理費用を算出するためには、事前情報として対象橋梁のどの部材が現在どういった要因でどの程度劣化しているかを把握する必要がある。「点検調査支援システム」は、点検業者がフィールドで橋梁の劣化状況を観測して健全度として記録するシステムであり、持ち運びが容易なタブレットパソコン上で稼動する。

点検者は、構造・交通安全性の確保、第三者被害の防止、効率的かつ計画的な維持管理の観点からシステム独自に構成された点検マニュアルに従い、橋梁の各要素について5段階の健全度評価を行う。併せて、劣化の原因を特定し、損傷の種類等を記録した上で事務所を持ち帰る。その後、これらの情報は自治体が管理するデータベースに取り込まれ、劣化予測の基準データとして活用される。

2.2 劣化予測と LCC 算定

劣化予測にあたっては、既往の研究や実例、自社のノウハウを整理してデータベース化した劣化予測式を用いる。まず、部材、材質、劣化の原因から基準となる予測式を特定し、環境条件による劣化速度の調整を行う。その後、定期的な点検調査で蓄積された健全度情報に基づいてさらなる補正を行い、最終的な予測式を決定する。

続いて、橋梁ごとに劣化に対する対策 (補修) のタ

あまの かずひろ
鹿島建設㈱ ITソリューション部
〒107-8348 港区赤坂 6-5-11
おおたに よして
鹿島建設㈱ 土木設計本部
〒107-8502 港区赤坂 6-5-30

イメージを決定する。対策のタイミングは維持管理シナリオとしてテンプレート化しており、特殊環境橋梁等を対象に戦略的に予防対策を行う戦略的対策シナリオ (A1)、あまり劣化が進まないうちに早めに補修する早期対策シナリオ (B1, B2)、ある程度劣化を許容する事後対策シナリオ (C1, C2)、最終的に架け替えを行う更新シナリオ (D)、塩害による鉄筋腐食を食い止める電気防食シナリオ (E) などから複数選択することができる。

シナリオが決まると、劣化予測によって対策実施時点の劣化の程度に応じた対策工法が決まり、維持管理に必要な補修費用が算出できる。これらの費用を部位、部材の最小評価単位である「要素」ごとに、予測期間 (例えば今後50年) を通して繰り返し積み上げることで中長期的なLCCを算定する。算定イメージを図1に示す。橋梁ごと、シナリオごとに計算したLCCは、予算計画における均等化の対象データとなる。

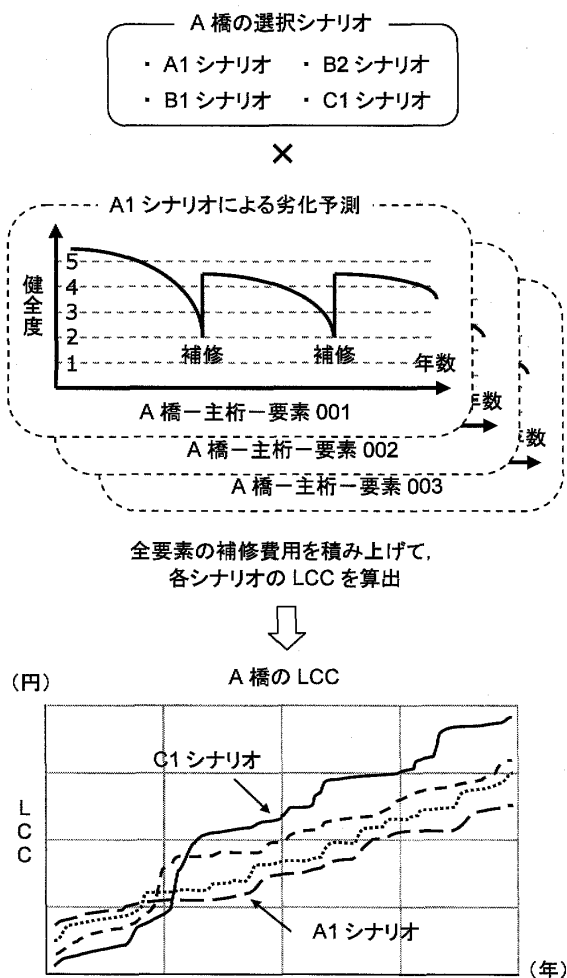


図1 LCC算定のイメージ

3. 予算計画の均等化

3.1 均等化の考え方

予算計画の均等化では、各橋梁をそれぞれのシナリオで運用すれば、全橋梁のLCC合計が小さく、かつ各年度の発生費用にバラツキがないかを検討する。ここで、「バラツキがない」「均等化された」状態を、指定した予算構成に対して累積超過額 (ある年度までの累積予算に対する累積補修費の超過額) が各年度で許容範囲 (予算倍率) 内に収まることとし、これを「照査に合格する」と呼ぶことにする。

これにより、対象となる問題を「照査に合格する」ことを制約条件とした「橋梁とシナリオの組合せ最適化問題」として扱うことができる。図2は、橋梁とシナリオの組合せ例を示したものである。組合せ1は、LCCは低いが累積超過額が予算に対する許容範囲を超えてしまうため照査は不合格となる。逆に、組合せ2はLCCが多少高くなるものの照査に合格して解候補となる。

3.2 最適化手法の検討

LCCを最小化するだけであれば、各橋梁のLCCが最小となるシナリオを選択し、それらを積み上げるだ

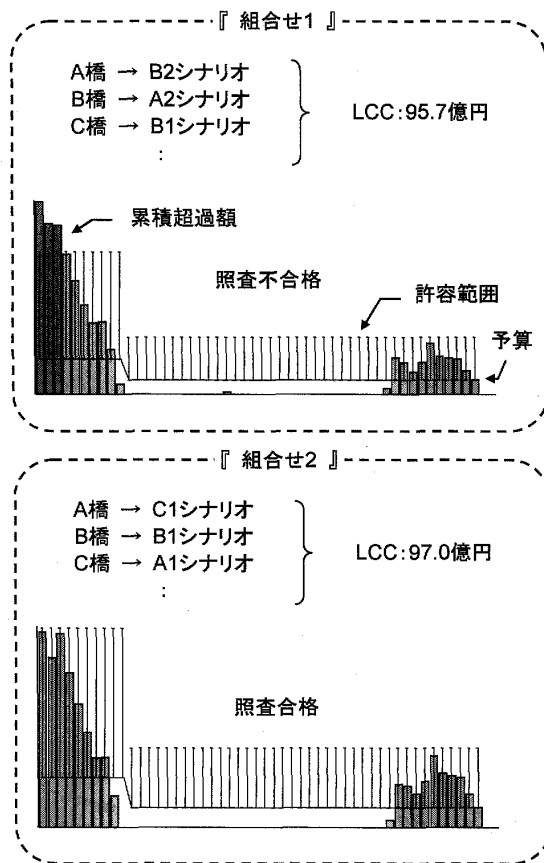


図2 橋梁とシナリオの組合せ例

けで良い。しかし、制約条件を加味すると単純には計算できない。すべての組合せを計算する場合、その数は橋梁ごとのシナリオ数の総積となり、例えば50橋が各々3つのシナリオを持つときは $3^{50} \approx 7.18 \times 10^{23}$ ケースとなる。

そこで、生産管理やプロジェクト管理などで利用される山積み・山崩し計画法をベースとした決定論的な手法と、GAによる確率的な手法の2つを用いて最適化を図ることとした。

3.2.1 山積み・山崩しによる均等化

まず、各橋梁においてLCCが最小となるシナリオを積み上げて、山崩しの初期状態とする(山積み)。続いて、式(1)に示す指標B/Cの値を計算し、最も大きな値を示すシナリオ変更パターンを選出する。B/Cが大きいシナリオ変更は、LCCの増加を抑え、かつ平準化対象年度より前にある補修費を後に回す効果が高いと考えられる。

$$\text{変更シナリオの決定指標} = B/C \quad (1)$$

B: シナリオ変更による平準化対象年度までの累積超過額の圧縮額

C: シナリオ変更によるLCCの増加額

平準化対象年度: 累積超過額が最大となる年度

その後、シナリオ変更後のLCCで再評価を行い、照査に合格するまで同様の操作を繰り返す。これは、山積みで現れた山(累積超過額のピーク)を崩しながら平らにしていく、平準化の作業といえる。平準化の過程で見つかった照査に合格する組合せは、予算条件を満たす1つの解となる。ただし、最初に見つかった解であって最適解とは限らない。また、無限ループを避けるために、一度計算した組合せに戻ることがないよう制約(いくつかのバリエーションあり)を設けており、その制約の中で変更可能なシナリオがなくなった場合には解なしで終了する。概略の処理フローを図3に示す。

3.2.2 GAによる均等化

GAは選択・淘汰、突然変異などの生物進化の原理に着想を得た確率的探索手法の一つで、近年様々な応用例が聞かれる。対象問題をGAでモデル化するためには、まず探索したい組合せのパターンを遺伝子として表現する必要がある。今回採用した遺伝子表現は非常にシンプルで、各橋梁に特定の遺伝子座(染色体上の遺伝子の場所)を割り振り、その値にシナリオ番号を格納するというものである。遺伝子座の値は一般に2値で表現するが、ここではシナリオ番号に相当す

る整数で表すこととした。これにより、一つの染色体で全橋梁に対するシナリオの組合せを合理的に表現することができる(図4)。

続いて、遺伝子の評価方法であるが、LCCの値と照査結果の2つの側面から評価を行うために、式(2)に示す評価関数を用意して、この値が低いほど良い組合せとした。ここで、照査結果はペナルティとして働くが、通常はウェイトW1, W2を1対1などに設定して、不合格となった場合には重い足かせとなるよう調整している。

$$\text{評価関数} = W1 \times LCC + (\text{if 照査合格 then } 0 \text{ else } W2 \times LCC) \quad (2)$$

W1, W2: 0より大きい任意のウェイト

次に、GA特有のオペレーションである遺伝的操作について説明する。まず、交叉処理であるが、交叉とはペアとなる2つの遺伝子間で遺伝子配列の一部を交換する処理であり、それぞれの優れた部分形質同士がうまく結合されれば飛躍的な進化が期待できる。今回は、交換の基点となる位置を複数設定できる複数点交叉を採用した。突然変異処理では、突然変異確率をバ

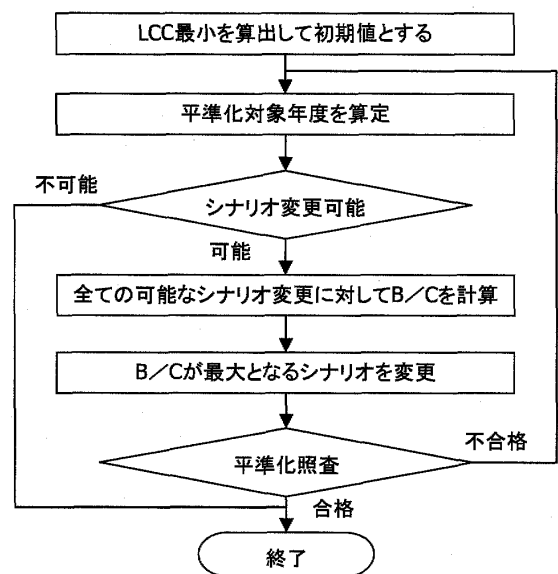


図3 山積み・山崩しの処理フロー

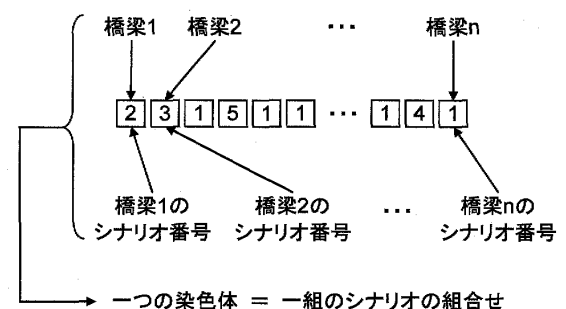


図4 遺伝子表現

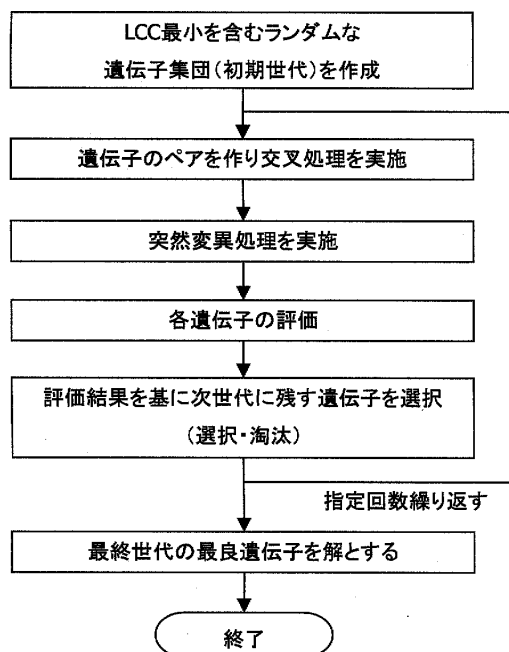


図5 GAの処理フロー

ラメータとして与え、その確率に従って遺伝子配列の一部を別のシナリオに置き換える。突然変異はGAの特徴的な操作であるが、これによって集団の多様性が増し、より広い解空間の探索が可能になる。

選択・淘汰では、評価結果に応じて次世代に残す遺伝子を決定する。選択方式としては、これまでいろいろな戦略が提案されているが、ここでは代表的な3種類の方式を実装した。評価値の高い上位遺伝子を残す「エリート戦略」、評価値に応じて選択確率を設定し、その確率に基づいて残す遺伝子を決定する「ルーレット戦略」、無作為に抽出した小規模集団から最良遺伝子を選抜していく「トーナメント戦略」である。また、上位のみエリート戦略で下位はルーレット戦略にするなど、2段階の選択方式にも対応した。図5は、全体の処理フローである。

4. システムの試行

ある自治体における742橋の維持管理費用について、今後50年間のシミュレーションを行った。LCCの算定処理においては、要素数20万超の構造的な規模が直接処理時間に影響して十数時間を要した。一方、均等化に関しては、橋梁ごとに集計済みのLCCを再利用することから、要素規模よりも橋梁とシナリオの組合せ数が問題となる。維持管理シナリオの選択肢は橋梁ごとにバラツキがあるものの、合計で3,000シナリオ、平均して一橋梁あたり約4シナリオであった。組合せ数は、単純に計算して $4^{742} \approx 5.35 \times 10^{446}$ という膨

表1 予算に関する制約条件

対象年度	はじめての 3年	次の 2年	その後の 45年
予算(億円)	34	26	14.5
許容範囲 (予算倍率)	3.0	3.0	3.0

表2 試行結果

	制約なし	制約あり	
	LCC最小	山崩し	GA
計算時間(秒)	—	150	110
LCC(億円)	787	807	806

大な数になった。計算にあたっては、CPU: Intel社 Pentium 4 3.0 GHz, メモリ: 1.5 GBの仕様を持つ、身近なデスクトップパソコンを使用した。表1は予算に関する制約条件であるが、早い時期ほど具体的な数字を見積もりやすい点に加え、早めに手を打って全体の予算を抑えたいという意図が含まれている。

試行結果を表2に示す。結果によると、GAの方が山崩しよりもわずかに低いLCCを算出しており、山崩しが通らない別の探索ルートを発見できていることが分かる。また、計算時間には大差がなく、絶対時間としても実用レベルといえる。従来のように人手で試算した場合には、細かなシナリオの想定が困難であるため、どうしても更新シナリオが中心となる。場合によっては、1,500億円程度になるとの推定もあり、シミュレーション結果からは700億円近い経費削減の可能性が示された。

5. おわりに

山崩しは発生費用が集中している部分を圧縮しながら単一経路を通して探索するため、解に至る過程が明解である。反面、解が見つからない場合や局所解に陥る可能性がある。一方、GAは制約条件に対する柔軟性が高く、また局所解から脱する手段を持っている。しかしながら、確率的な手法であることから具体的な探索過程については説明力が弱い。

これまで、GAのような確率的・発見的な手法は内包するあいまい性からユーザに敬遠される傾向があった。億単位の費用に関する意思決定に影響するとなればなおさらである。しかし、今回は決定論的な手法と併用して比較検討を容易にしたことが奏功し、大きな

障壁もなくユーザに受け入れられて、GA活用の足掛かりとすることができた。また、遺伝子表現としてモデル化しやすい題材であったことも手伝い、GAを基本的な構成のまま無理なく適用できた。

現状、数百橋程度の問題に対してはほぼ実用レベルといえるが、数千～数万橋を対象とした場合には、橋梁数そのまま遺伝子長となる構造から、処理時間の問題に加えてGAのメリットを十分に引き出せない可能性がある。今後、そのような問題を扱うためには、新たな遺伝子モデルの検討が必要であろう。

参考文献

- [1] 北野宏明編：“遺伝的アルゴリズム,” 産業図書 (1993).
- [2] 北野宏明編：“遺伝的アルゴリズム2,” 産業図書 (1995).
- [3] 北野宏明編：“遺伝的アルゴリズム3,” 産業図書 (1997).
- [4] 伊庭斉志：“遺伝的アルゴリズムの基礎—GAの謎を解く—,” オーム社 (1994).
- [5] Kaneuji, M., et al.: “Development of BMS for large number of bridges,” *Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost (IABMAS)*, 2006, pp. 597-598.
- [6] Kigure, T., et al.: “Development of the inspection support system for bridge asset management,” *Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost (IABMAS)*, 2006, pp. 727-728.