

北海道の橋梁の維持管理計画に関する一考察

On bridge management strategy of bridges of Hokkaido prefecture by genetic algorithm

北海学園大学工学部土木工学科
 北海学園大学大学院
 北海学園大学大学院
 北武コンサルタント(株)

正 員 杉本博之 (Hiroyuki Sugimoto)
 ○ 学生員 中野大志 (Hiroshi Nakano)
 学生員 赤泊和幸 (Kazuyuki Akadomari)
 正 員 渡邊忠朋 (Tadatomo Watanabe)

1. まえがき

供用期間中の橋梁は維持管理を行わなければ必ず寿命がやってくる。橋梁は重要な社会基盤施設の一つであり、多数の橋梁を長期間にわたって供用していくためには、合理的で効率的な維持管理が必要である。

一般的に橋梁の維持管理業務は自治体が行っている。自治体は供用開始時期や環境の異なる多数の橋梁を一括で管理しなければならない。そこで近年、橋梁維持管理システム(以下BMS)が注目されている。BMSは基本的にライフサイクルコスト(以下LCC)を最小化することを目的としている。基本的な流れは定期的な橋梁点検を実施し、点検データの蓄積を行い劣化の進行状況を予測し、何らかの手法を用いて対策順、対策部位を決め、長期的に最適な維持管理計画を行うことである。

北海道においては点検結果の蓄積がないこと、また過去の補修履歴の保存がほとんどないために、劣化の進行速度の設定が不十分であり、現状では最適な維持管理計画を立てるのは困難である。

現状での維持管理は供用可能な限り橋梁を使用し、供用が危険となったところで補修を行う考え方が主流のようである。一方で橋梁を定期的に点検し劣化の早期発見、早期補修を行う考え方など様々な議論がある。いずれにしても定期的な点検と点検結果の蓄積が重要であると考えられる。

このような背景のもと筆者らは、以前にユーザーコスト(以下UC)¹⁾による橋梁の重要度と、点検結果による橋梁の部材、部位の健全度の2軸による簡便な維持管理システム(以下sBMS)を提案した²⁾。sBMSは現状で得られる客観的なデータのみで計画を立てられるシステムである。このシステムの実施と並行して、点検結果や補修履歴の蓄積をしていくことで近い将来LCCを考慮したシステム³⁾⁴⁾に移行していくことが考えられる。

また筆者らは以前にLCCを考慮したシステム作成の前段階として、数百の橋梁の数十年にわたる計画を考慮したBMSの対象となる橋梁群モデルを作成し、それらに対して最適化手法である遺伝的アルゴリズム(以下GA)を適用⁵⁾し、どの程度まで対応できるか検討した。現在では北海道札幌土木現業所管轄の橋梁を対象としてデータベースの作成を行い、劣化モデルについては種々の耐用年数、種々の形状の劣化曲線に対応させ、補修費コストはより現実的なコストモデルの計算を導入し検討を加えている⁶⁾。

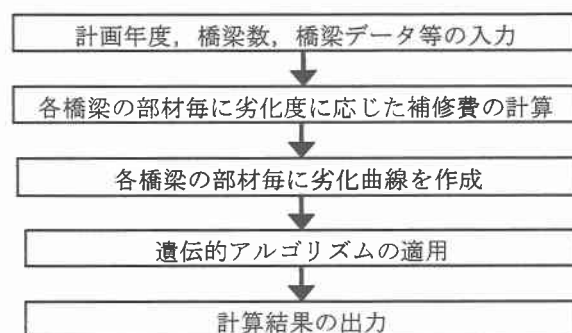


図-1 基本的なシステムの流れ図

今回、本研究では以上のように再構築した橋梁群モデルにGA⁷⁾を適用し、GAで得られた計算結果を示す。また劣化度を固定して補修を行った3種類の計算結果と比較を行い、考察を加える。

2. 橋梁群モデルへのGA適用

本研究のシステムは長期的な計画の中で多数の橋梁の維持管理を考え、年度予算の制約の中で、どの橋梁の、どの部材から、どの年度に補修を行うのかを決定していくシステムである。現状では橋梁のデータベースの不足は否めなく、不足しているデータについては統計的処理により与えているが、データが入り次第変更可能なように設定している。

以下に橋梁群モデル作成の概要、最適化問題の定式化、GAのコーディングについて順に説明していく。

2.1 橋梁群モデル作成の概要

橋梁群モデル作成の流れを図-1に示す。まず計画年度、橋梁数、年度予算等を入力する。そして橋梁数に応じて橋梁のデータを入力する。今回は北海道の札幌土木現業所管轄の橋梁を対象としてデータベース⁸⁾の作成を行った。データベースは9項目(橋梁番号、構造形式、径間数、橋長、主桁高さ、有効幅員、下部工高さ、主桁本数、ユーザーコスト)を設定しており、部材は7種類(床版、主桁、橋脚、橋台、伸縮装置、支承、橋面工)に分類している。

次に各橋梁の部材毎に、データベースを元にして劣化度に応じた補修費の計算を行う。劣化度については北海道で行われた橋梁点検に従い、1(悪い)から5(良い)の5段階設定した。コストモデルは構造形式により分けられており、1橋あたり5段階の劣化度と7部材により

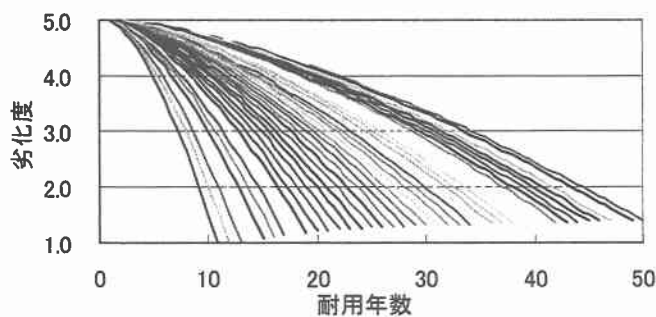


図-2 劣化曲線の耐用年数

部材	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1

8	3	1	9	4	5	7	2	3	10
部材 1	部材 2	部材 3	部材 4	部材 5					

3	8	1	9	4	5	2	7	3	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

3	8	9	4	2	7	3	10
---	---	---	---	---	---	---	----

図-3 デコーディング例

表-1 橋梁データ

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	UC (C0/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	22	38	22	29	29
3	1	37	1.85	26.0	7.0	14	557	プレテンT桁	20	26	22	42	20	32	18
4	1	20	0.75	16.0	8.1	1	2171	プレテン中空床版	22	30	22	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	22	36	22	24	23
8	2	45	1.48	5.0	8.4	4	37	ボス텐T桁	20	30	37	41	18	31	21
9	4	111	0.91	13.2	9.3	1	0	ボス텐中空床版	22	28	37	40	12	33	22
10	3	92	0.95	11.5	4.2	1	91	ボス텐中空床版	22	33	43	40	20	32	21

35種類の補修費が計算される。

次に各橋梁の部材毎に劣化曲線を任意に与える。現状では劣化曲線の特定は困難であるので、仮定の下に作成して検討した。劣化曲線を図-2に示す。図は縦軸に劣化度、横軸は耐用年数を示している。耐用年数は劣化度が1になる年数を示しており、11年から50年までの40種類設定した。耐用年数は部材毎に設定している。劣化曲線式は次式で表される。

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

$r(y)$ は劣化度、 y_0 は耐用年数、 y は年数を示している。また f は劣化曲線の形状を示しており今回の計算では $f=1.5$ を使用している。

この橋梁群モデルに対して最適化手法であるGAを用い、対策順、対策部位の決定を得る。

2.2 最適化問題の定式化

本研究では対策順、対策部位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。

- ①目的関数：補修費とUCの総和の最小化
- ②制約条件：各年度で補修費が予算の制限を超えない
- ③設計変数：補修を行う年度

①の補修費については、材料費等の直接工事費の他に、仮設費等の間接工事費と、企業の運営に必要な経費等の一般管理費も含む。UCについては、補修を行った時に橋梁を通行止めにする必要がある場合は、そのとき発生

する通行止め日数を橋梁毎に計算を行い、橋梁のデータベースから得られる1日あたりのUCと通行止め日数を乗じることにより、各橋梁のUCが算出される。また部材が劣化度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（ペナルティに相当）になるように設定し、その場合もUCが算出される。

②の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。

③の設計変数について補修を行う年度とし、コーディングについては次節で述べる。

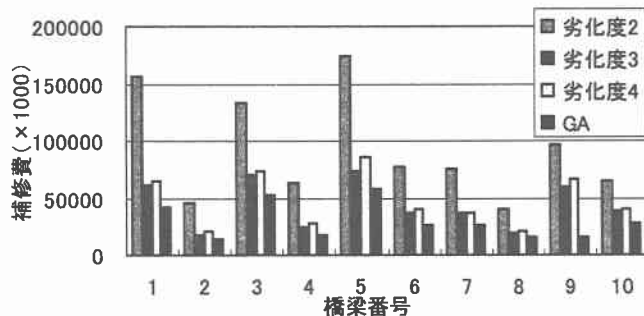
2.3 GAのコーディング

設計変数については補修を行う年度としたが、7部材50年の計画を考えた場合、補修をあるなし(0, 1)の2進数でコーディングを行うと1橋で350変数となり効率的とはいえない。そこで本研究では1部材に対して最大入る補修回数を設定し、補修の年度を10進数でコーディングを行った。

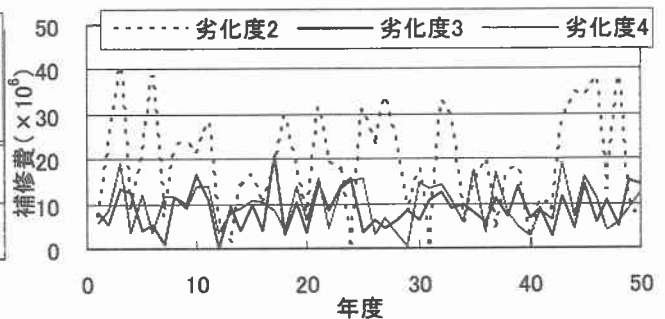
デコーディング例として5部材、補修回数2回、10年の計画を図-3に示す。図より2進数でコーディングを行うと5部材、10年の計画を考えるため50変数になる。そこで2進数から10進数にコーディングを変更することにより、5部材、補修回数2回を考えることにより10変数まで減らすことができる。次に解析により各部材毎に並べ替えを行う。次に補修を行う年度が劣化度5の場合と同年度の場合は削除する。図の例では2部材の1年目が劣化度5であった場合は削除する。また

表－2 各解析の計算結果

解析	橋梁数	(×1000unit)					補修回数	補修が入った時の劣化度		
		補修費	UC	補修費+UC	年度予算	年度最大補修費		4	3	2
劣化度4	10	476500	0	476500	制限無し	19381	279	207	72	0
劣化度3	10	439800	0	439800	制限無し	20974	201	0	201	0
劣化度2	10	927500	82240	1009740	制限無し	41003	159	0	0	159
GA	10	297700	1134	298834	11000	10809	182	92	83	7



図－4 橋梁別の補修費



図－5 劣化度別の年度と補修費の推移

3 部材の 5 年目も 4 年目に補修を行っているので、5 年目は劣化度が 5 であるため削除する。結果的には GA のコーディングにより 50 変数から 10 変数まで減ることになる。

3. 計算結果

数値計算は 10 橋を対象として行い、各橋梁毎に 7 部材、50 年間の計画（計画年数）を考慮することにする。今回、鋼橋 5 橋、コンクリート橋 5 橋の 10 橋を使用した。橋梁のデータを表－1 に示す。表の UC の単位の C_0 は時間コストであり、本研究では 1800unit 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、橋面工に対応している。橋梁番号 2、3、4、7 については、1 径間であるため部材番号 3 の橋脚の耐用年数は存在していない。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。今回の計算は GA の計算結果と、すべての部材を劣化度 4 で補修を行った計算結果、すべての部材を劣化度 3 で補修を行った計算結果、すべての部材を劣化度 2 で補修を行った計算結果の 4 種類を示す。計算結果を表－2 に示す。表より劣化度 4 で補修を行った計算結果で、補修が入った時の劣化度が 3 の時に 72 回の補修が入っているが、これは伸縮装置と支承は劣化度 4 の時のコストモデルでは補修が行われないため、例外として劣化度 3 で補修を行っている。橋梁毎の補修費を図－4 に示す。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。

3. 1 劣化度別の計算結果

始めに劣化度 2、3 及び 4 で補修を行った計算結果の比較を行う。表－2 より劣化度 3、4 で補修を行った計算結果は UC が発生していないが、これは、通行止め日数

は劣化度 1、2 の場合のみ発生するので、劣化度 3、4 で補修を行った計算結果は通行止め日数が発生しないため UC は発生しない。劣化度 2 で補修を行った計算結果の UC は 8200 万 unit であり、劣化度 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ので UC が算出された。劣化度 2、3、4 で補修を行った計算結果を比較すると、劣化度 3 で補修を行った計算結果が一番目的関数値が低く、次に劣化度 4 で補修を行った計算結果、劣化度 2 で補修を行った計算結果が一番目的関数値が高い。これは一回あたりの補修費は劣化度 4 で補修を行う場合が一番低く、次に劣化度 3、劣化度 2 の順で低くなるが、補修回数では表－2 より劣化度 4 で補修を行った計算結果が一番多いため、トータルでの補修費は劣化度 4 より劣化度 3 で補修を行った計算結果の方が低くなる。また劣化度 2 で補修を行った計算結果は、補修回数は一番少ないが、一回あたりの補修費が大がかりになるため補修費が高い。そのため劣化度 3 で補修を行った計算結果が一番低い目的関数値になった。年度あたりの最大補修費は劣化度 3、4 で補修を行った計算結果はほぼ同じであるが、劣化度 2 で補修を行った計算結果に関しては 2 倍近い差となっている。劣化度別の年度と補修費の推移を図－5 に示す。図の点線は劣化度 2、黒の実線は劣化度 3、灰色の実線は劣化度 4 で補修を行った計算結果を示している。図より劣化度 2 で補修を行った計算結果は年度の補修費が高く、また年度毎にばらつきが大きい。劣化度 3、4 で補修を行った計算結果は同じ傾向で推移しており、劣化度 2 で補修を行った計算結果と比べれば年度毎のばらつきは小さい。

図－4 より、橋梁毎の補修費の結果では劣化度 2 で補修を行った計算結果が際だって高く、劣化度 3、4 で補修を行った計算結果はほぼ同様であるが劣化度 3 で補修を行った計算結果の方が若干低い。しかし劣化曲線の耐用年数や形状によっては結果が逆転すること考えられ、

また計画年数の変更で補修回数が変わるので、劣化度 4 と劣化度 3 で行った計算結果の善し悪しの判断は難しい。

3. 2 GA の計算結果

次に GA の計算結果を示す。今回 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。年度予算は 1100 万 unit、1 部材に最大入る補修回数は 5 回に設定して計算を行った。

GA の計算結果と目的関数値が一番低かった劣化度 3 で補修を行った計算結果を比較する。表-2 より、劣化度 3 で補修を行った計算結果の目的関数値は、4 億 4 千万 unit、GA の計算結果の目的関数値は、2 億 9 千 9 百万 unit となり、約 1 億 4 千万 unit の差となった。今回 10 橋の計算であり、1 年間あたりに換算すると 280 万 unit の差であるが数百の橋梁を対象とした場合は顕著に差が表われると考えられる。また年度別で比較を行うと、劣化度 3 で補修を行った結果は年度予算の制限はなく、年度あたりの補修費の最大値は 2100 万 unit、GA の年度あたりの補修費の最大値は 1080 万 unit であり、約 2 倍の差が出た。

表-2 より GA の計算結果で補修が入った時の劣化度は、ほぼ劣化度 3、4 で占められ劣化度 2 では 7 回補修が行われており、劣化度 3 と劣化度 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ていることがわかる。図-4 より橋梁毎の補修費の結果では規模の小さい橋梁では差が小さいが、規模が大きくなると差が大きくなっていることが見て取れる。年度毎の補修費の推移を図-6 に示す。図は縦軸に補修費、横軸に年度をとっており、黒の実線が GA、灰色の実線が劣化度 3 で補修を行った計算結果を示している。劣化度 3 で補修を行った計算結果は、年度予算の制限がないこと、また必ず劣化度 3 で補修を行うため、GA の計算結果と比べると年度毎にばらつきが大きい。GA の計算結果は、年度予算の制限があるため、年度毎のばらつきが小さいが、年度によっては年度予算を使い切っていない部分もある。

4. あとがき

本研究では GA で得られた計算結果と、劣化度を固定して補修を行った 3 種類の計算結果を示して比較を行った。劣化度別の比較では、劣化度 3 で補修を行った計算結果が最も目的関数値が低くなった。これは計画年数での補修回数と一回あたりの補修費が影響していることが考えられる。また補修費の中には一般管理費が含まれているため劣化度間の補修費の差が小さくなった影響もあったと考えられる。現状では劣化曲線を仮定の下に与えており、劣化曲線の耐用年数や形状から計算結果が変化することもあるが、今回の計算結果から、ある程度の補修時期の判断の基準になるのではないかと考えられる。

北海道での現状の維持管理は、基本的に劣化度 5 は問題なし、劣化度 4 と劣化度 3 では記録、劣化度 2 で詳細調査、劣化度 1 で補修となっている。補修に伴う橋梁の通行止めを考慮した場合、劣化度 2 で補修を行った計算結果の UC は 8200 万 unit であり、劣化度 1 での補修や

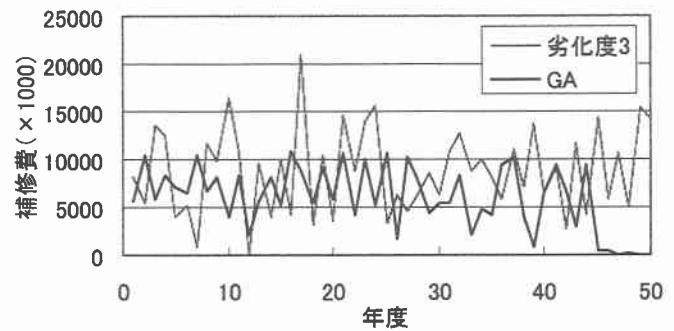


図-6 年度と補修費の推移

数百の橋梁の維持管理を考えた場合、少なくない UC の値が算出されることから、UC も補修時期に影響してることが予想される。

GA の計算結果と劣化度 3 で補修を行った計算結果の比較では、目的関数値で約 1.5 倍、年度あたりの補修費で約 2 倍近い差となった。GA の結果は劣化度 3 と劣化度 4 での補修を組み合わせることで、年度予算の制限をクリアしており、今回の計算結果では一番良い目的関数値が算出された。しかし年度によっては予算を使い切っていない場合があり、今後の検討課題としたい。しかしながら現状では GA の計算は年度予算、UC を考慮しており、対策順、対策部位の特定に有効な手段ではないかと考えられる。

今回 BMS の対象となる橋梁群モデルに GA を適用し考察を加えた。今後検討することは多々あると思われるが、点検結果の蓄積、補修履歴の保存と並行して、本システムを改良していくことで将来に向けた維持管理に備えることができると考えている。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 杉本・高橋・後藤・中野・田村：UC を利用する簡便な橋梁維持管理システムに関する一提案，土木学会北海道支部論文集，第 58 号/I-1，pp.2-3，2002.
- 3) 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.
- 4) 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，2002.
- 5) 杉本・中野・渡邊：BMS における GA 適用の可能性について，土木学会第 57 回年次報告概要集，第 58 号/I-223，pp.445-446，2002.
- 6) 杉本・赤泊・中野・渡邊：北海道の橋梁の LCC モデルの構築と補修費の推定について，土木学会北海道支部論文集，第 59 号掲載予定.
- 7) 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，北海学園大学学園論集，第 96・97 号，1998.
- 8) 赤泊・坪田・中本：橋梁維持管理のためのデータベースの作成とその利用について，平成 13 年度北海学園大学卒業論文.