

ライフサイクルコストを考慮したコンクリート橋梁群の最適維持管理計画の策定

An Optimal Maintenance Planning for Many Concrete Bridges Based on Life Cycle Cost

伊藤弘之*・高橋祐治*・古田均**・田丸伸一***・亀田学広***

Hiroyuki ITO, Yuji TAKAHASHI, Hitoshi FURUTA, Shin-ichi TAMARU and Takahiro KAMEDA

*鹿島建設(株) 土木設計本部 設計技術部 (〒107-8502 港区赤坂 6-5-30)

**工博 関西大学教授 総合情報学部 (〒569-1095 高槻市霊仙寺町 2-1-1)

***関西大学大学院 総合情報学研究科 (〒569-1095 高槻市霊仙寺町 2-1-1)

For concrete bridges inherently subject to chloride attack and neutralization throughout their service lives, an optimal maintenance scenario has to be selected among many alternative scenarios in terms of the total cost and the performance of the bridges. The total cost, which is defined as life cycle cost, includes all related cost, such as maintenance, reinforcement and replacement. The deterioration of concrete due to chloride attack and neutralization has to be accounted for as well, which makes the performance of the concrete bridges lower.

An attempt is made in this study to apply Genetic Algorithm (GA) to select an optimal maintenance scenario for a number of concrete bridges with different levels of deterioration. The result showed that GA can be applied to select the optimal planning with the minimum life cycle cost and the required performance for serviceability and safety.

Key Words : Genetic Algorithm, Maintenance Plan, Life Cycle Cost, Concrete Bridge

1. はじめに

コンクリート構造物は、塩害や中性化、疲労などの経年劣化によって保有性能が低下する場合が少なくない。この場合、構造物の供用期間において、要求される使用上、安全上の性能を保持するための維持管理が必要となる。従来の構造物においては、維持管理が計画的に行われていないために、深刻な劣化が判明した後の事後対策として大規模な対策工を必要とするなど、非効率的と思われる事例も存在する。今後は維持管理費が増大すると予測されていることから、調査・点検に基づく劣化予測技術の向上のみならず、ライフサイクルを考慮した計画的な維持管理が求められている。

ライフサイクルを考慮した経済的で効果的な維持管理計画の策定は、数多く存在する補修・補強工法をいつ、どのように組み合わせて実施すればライフサイクルコストを最小化できるかという組み合わせの最適化問題に帰着する。しかしながら、維持管理計画の策定にはパラメータが多数存在し、その組み合わせ数は膨大となるため、最適解が現実的な時間では得られない場合が多い。

このような最適化問題の解法のひとつとして、近年、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, 以下 GA と呼

ぶ)が注目され、研究が進められている。GA は離散変数を扱う組み合わせ最適化問題に適しているといわれており、主に計算量を減らして準最適解を得る目的で利用されている¹⁾。

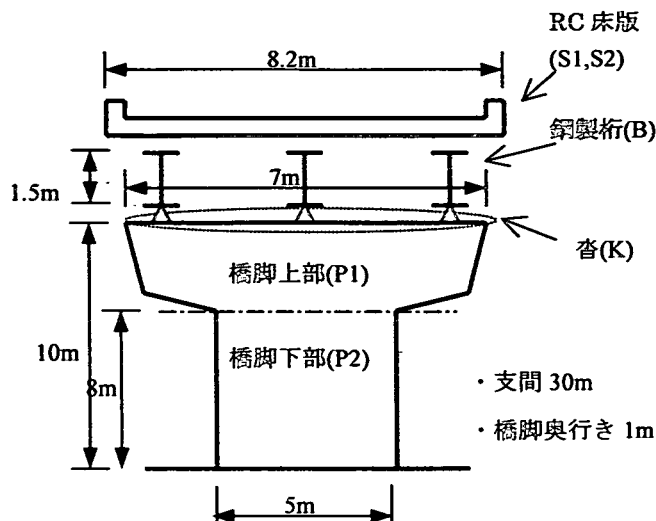
本研究では、異なる劣化条件下にある既設のコンクリート橋梁群を対象とした維持管理計画の策定に、GA を適用した。橋梁群を対象とすることで、補修・補強の同時施工による仮設費等の費用削減効果を考慮している。

2. 検討条件

2.1 対象橋梁群

(1) モデル路線と構造寸法

本研究でモデルとしたコンクリート橋梁群は、海岸付近を通る高架の道路橋を想定している。このうち、維持管理計画策定の対象とするのは、連続する 10 カ所の橋脚及び 10 カ所の床版(鋼製桁と RC 床版の合成構造)からなる区間である。高架橋の 1 径間は、6 つの構造部位(橋脚上部、橋脚下部、杓、桁、床版支承部、床版中央部)から構成され、10 径間ともに同一構造である。構造寸法及び各部位の呼称を図-1 に示す。



(橋梁 00, 橋梁 01, ..., 橋梁 09)

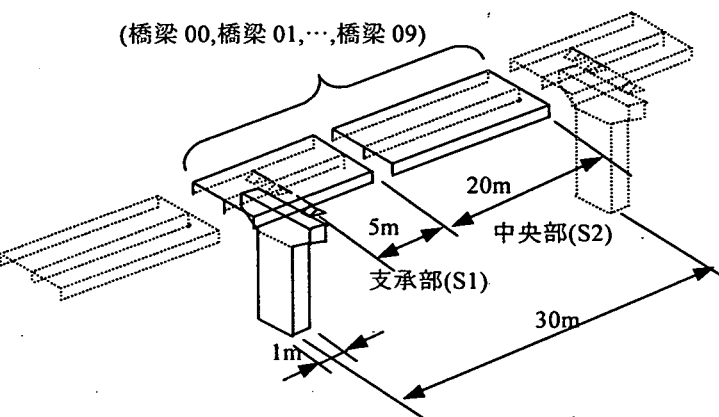


図-1 構造寸法及び各部位の呼称

(2) 環境条件

環境条件は構造物の劣化性状に大きな影響を与える要因のひとつであり、地形、風向、飛沫の有無など場所ごとに異なる。これらの環境条件を考慮した代表的な劣化機構と、橋梁群完成までの経過年数を各橋梁に設定した。各橋梁の橋梁群完成までの経過年数と環境作用による主な劣化機構を表-1に示す。

表-1 完成時の経過年数と環境作用による劣化機構

橋梁名	橋梁群完成時の経過年数	主な環境作用による劣化機構
橋梁 00	00 年	中性化
橋梁 01	00 年	中性化
橋梁 02	02 年	塩害(弱)
橋梁 03	02 年	塩害(中)
橋梁 04	02 年	塩害(強)
橋梁 05	02 年	塩害(中)
橋梁 06	02 年	塩害(強)
橋梁 07	01 年	塩害(中)
橋梁 08	01 年	塩害(弱)
橋梁 09	01 年	塩害(弱)

2.2 構造部材の性能低下

(1) 考慮する劣化機構

一般にコンクリート構造物の性能が低下する要因としては、構造物を取り巻く環境条件、気象条件、外力条件など外的要因のほか、設計条件及び施工条件による内的要因がある。また、主な劣化機構としては、中性化、塩害、凍害、化学的侵食、アルカリ骨材反応などの環境作用が原因のものと、疲労や過大荷重などの主に荷重条件が原因のものに大別される。

実際には、中性化と塩害、塩害とアルカリ骨材反応、塩害と凍害など複数の劣化機構によって劣化が生じる複合劣化の場合があるが、本研究では劣化機構として、①表-1に挙げた主な環境作用が原因の劣化機構(塩害または中性化)と、②繰り返し荷重による疲労、の2つを考慮した。

(2) 部材の性能低下の定義

本研究では、部材の性能を、健全時に有している性能に対する割合として性能指数(IP)で表す。部材の性能低下は、考慮する部位により劣化機構が異なるため、各構造部位(橋脚上部及び下部、査、桁、床版支承部及び中央部)に区分して設定した。

橋脚の性能低下は環境作用の影響が主要因と考え、鉄筋残存率で表した。鉄筋腐食の過程はコンクリート標準示方書²⁾に基づき、潜伏期(T_0)、進展期(T_1)、加速期(T_2)を経て腐食するモデルを用いた。性能低下モデルを図-2(a)に示す。

査の性能低下、桁の性能低下は環境条件によらずそれぞれ、ゴム支承の耐用年数、塗覆装の耐用年数で表した。性能低下モデルを図-2(b)に示す。

床版の性能低下は環境作用と繰り返し荷重の両方の影響によると考え、鉄筋残存率及び疲労に対する耐用年数を比較して劣化の進行が速い方を床版の性能低下として表した。

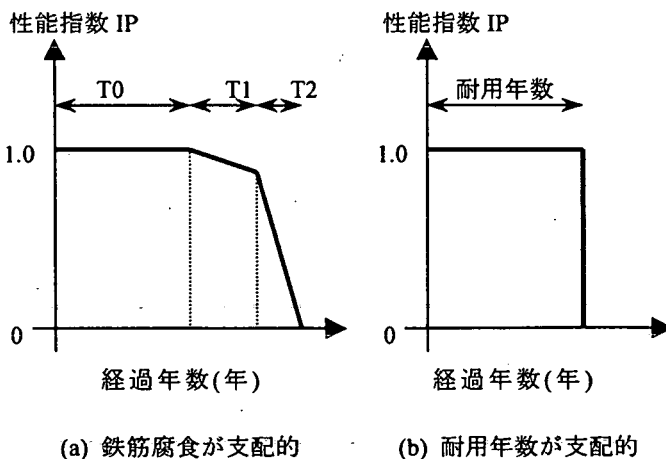


図-2 性能低下の概念

(3)性能低下特性

部材の劣化進行速度はかぶり厚さ、環境条件等によって異なるため、部位及び環境条件ごとに設定した。劣化進行速度は同じ環境下にあっても異なる場合があるが、ここでは平均的な値として設定した。

橋脚の平均的な性能低下特性を図-3に示す。なお、塩害(中)環境及び塩害(強)環境において、橋脚下部(P2)の劣化進行が橋脚上部(P1)よりも速いのは、強風時に飛沫を浴びるためである。

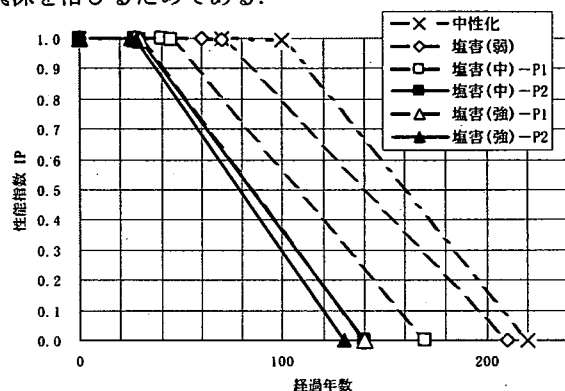


図-3 橋脚の平均的な性能低下特性

沓、桁の平均的な性能低下特性を図-4に示す。環境条件によらず、同じ速度で低下する。

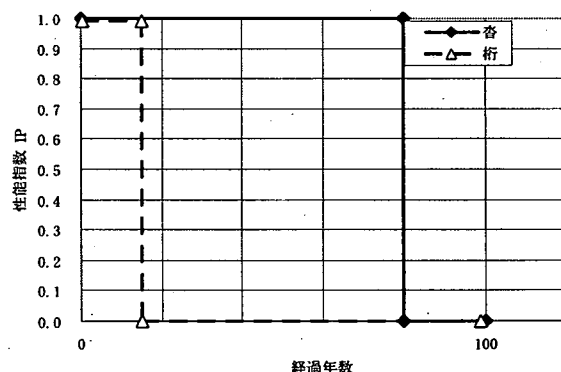


図-4 沓、桁版の平均的な性能低下特性

床版の平均的な性能低下特性を図-5に示す。中性化環境及び塩害(弱)環境では、環境作用による劣化進行に比べて繰返し荷重による劣化進行が速く、逆に塩害(中)環境及び塩害(強)環境では、繰返し荷重によ

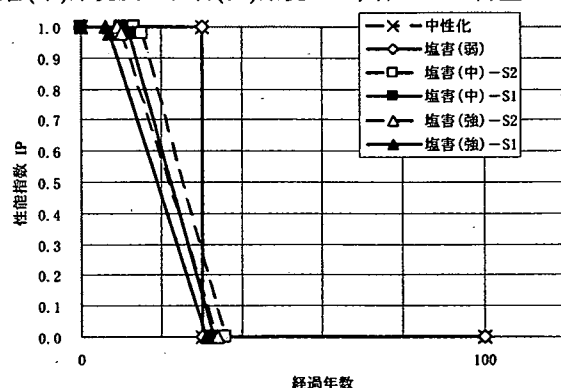


図-5 床版の平均的な性能低下特性

る劣化進行に比べて環境作用による劣化進行が速い。

なお、塩害(中)環境及び塩害(強)環境において、床版支承部(S1)の劣化の進行が、床版中央部(S2)より若干速いのは、かぶり厚が小さいためである。

2.3 性能低下に対する対策

(1) 対策の種類と適用範囲

構造物の性能低下が問題となる場合、対策が必要となる。本研究では構造物の性能低下に対し、無対策、補修・補強、更新、架替のいずれかを選択肢とした。各部位に適用できる対策工法とその効果を表-2に示す。対策の効果は同じ環境下にあっても異なる場合があるが、ここでは平均的な値として設定した。

なお、床版部に適用できる対策は、環境条件に応じて次のように設定した。

①中性化環境及び塩害(弱)環境では、繰返し荷重による劣化進行が速いため、更新のみ実施し補修・補強は行わない。

②逆に塩害(中)環境及び塩害(強)環境では、環境作用による劣化進行が速いため、補修・補強を実施し、疲労に対する耐用年数まで性能を維持する。

表-2(1) 補修・補強の効果

部位	対策工法	平均的な効果の内容
橋脚 床版	表面塗装	性能低下を7年間抑止
	表面被覆	性能低下を10年間抑止
	断面修復 (鉄筋補強)	性能指数を100%まで回復。その後は初期の劣化曲線に従って劣化する
	脱塩 (再アルカリ化)	現状の性能指数から初期の劣化曲線に従って劣化する
	電気防食	性能低下を40年間抑止
	断面修復 及び表面被覆	性能指数を100%まで回復させ、性能低下を10年間抑止。その後は、初期の劣化曲線に従って劣化する

表-2(2) 更新の効果

部位	対策工法	平均的な効果の内容
桁	鋼桁塗装	初期性能を耐用年数だけ維持
沓	支承取替	初期性能を耐用年数だけ維持
床版	打替	初期性能を耐用年数だけ維持

表-2(3) 架替の効果

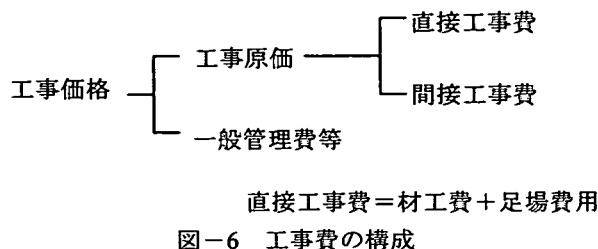
部位	対策工法	平均的な効果の内容
すべて	架替	性能指数を100%まで回復。その後は、初期の劣化曲線に従って劣化する

(2) 施工範囲

2.2(2)で示したように、劣化進行は構造部位を最小単位として設定している。したがって、各対策工法を実施する場合の施工範囲も構造部位を最小単位とした。

(3) 工事費

橋梁群全体にかかる工事価格を年度ごとに積算し、供用期間中の各年度工事価格を合計したものを工事費(ライフサイクルコスト、以下LCCと呼ぶ)と定義する。なお、将来発生する工事価格も全て現在価値で評価する。各年度の工事価格の構成を図-6に示す。



間接工事費、一般管理費等は、国土交通省土木工事積算基準³⁾に基づき算出した。直接工事費と工事価格の関係を図-7に示す。

直接工事費は材工費及び足場費用に分けて算出した。材工費及び足場費用の施工単価を表-3に示す。施工単価は実勢のマクロ単価⁴⁾を参考に設定した。

表-3(1) 材工費 (単位 千円)

対策工法	対象部位	橋脚 (/m ²)	杓 (/基)	桁 (/m ²)	床版 (/m ²)
補修・補強	表面塗覆装	20	—	—	20
	表面被覆	70	—	—	50
	断面修復	530	—	—	270
	脱塩	90	—	—	90
	再アルカリ化	90	—	—	—
	電気防食	100	—	—	100
更新	断面修復 +表面被覆	580	—	—	320
	鋼桁塗覆装	—	—	20	—
	支承取替	—	1,400	—	—
	床版打替	—	—	—	150
架 替		5,000(/m)			

表-3(2) 足場費用(単位 千円)

対象部位	橋脚 ^{*1}	杓	桁	床版 ^{*2}
足場費用	360	360	4,830	690
	190	—	—	510

*1 上段は橋脚上部(P1)まで、下段は橋脚下段(P2)まで設置する場合の費用

*2 上段は床版支承部(S2)まで、下段は床版中央(S1)まで設置する場合の費用

上記の方法で工事費を積算することで、以下の点を考慮することができる。

①同時に補修することによる足場費用削減効果：例えば、橋脚上部と橋脚下部を同時に補修すれば、橋脚下部の足場費用を削減することができる。

②同じ年度内に補修することによる一般管理費等、直接工事費以外の費用削減効果：直接工事費が大きいほど、直接工事費に対する工事金額の割合は小さい。

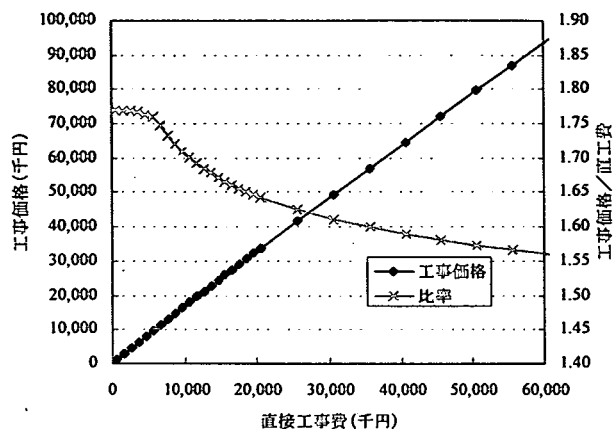


図-7 直接工事費と工事価格

3. 遺伝的アルゴリズムの最適維持管理計画への応用

3.1 遺伝子記述と適応度の定義

(1) 維持管理計画の遺伝子記述

本研究の問題は、対策工法と、施工時期、施工部位に関するスケジュール $[S_{ij}]$ を決定することにある。このスケジュール $[S_{ij}]$ を個体としてGAで扱うためには、遺伝子列で規定する必要がある。無対策も含め8通りある対策工を「遺伝子」とし、遺伝子を供用年数(100年とする)分、施工部位数だけ並べて「遺伝子列」とした。 $[S_{ij}]$ は次のような遺伝子列として記述できる。

$$[S_{ij}] = \begin{pmatrix} 0000000100000060000 & \cdots & 00200010000 \\ 0000000300000030000 & \cdots & 00000030000 \\ 0000002000000060000 & \cdots & 00200010000 \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ 0000100050000010005 & \cdots & 00100000500 \end{pmatrix}$$

i: 施工部位を示す番号, 1~60

j: 施工時期を示す番号, 1~100

※i行j列目にある S_{ij} は、i番目の部位のj年目に実施する対策の種類を表す

図-8 個体の遺伝子記述

部位の数は対象とする10橋全体で60あり、供用年数を100年とすると、6,000の遺伝子を含む遺伝子列となる。この記述方法は便宜上行列の形で表しているが、実際のGAでは2進数で表される18,000ビットの

線列である。本研究内容の特性から、最適な個体には「無対策」が多く存在し、解の探索が困難となることも予想されたが、最も簡易な方法として採用した。

(2) 初期個体群の生成

乱数を発生させて、解の候補となる初期個体群を生成する。ただし、発生させた個体が致死遺伝子の場合、もう一度発生させ直す。個体数はあまり多く設定すると探索処理効率が低下するため、本研究では実用性を考えて 2,000 個体とした。個体数と処理効率の問題については、今後の課題としたい。

(3) 適応度関数の定義

維持管理計画を策定する際の必要条件は、各部位の性能指数が 0.8 を下回らないこと、供用期間(100 年とする)中の維持管理にかかる工事価格を最小とすることとした。これらの条件を関数として定式化したものが適応度関数であり、式(1)のとおりである。

$$F = -LCC - \lambda G_i \rightarrow \max \quad (1)$$

$$G_i = \max\{0.8 - IP_i, 0\}$$

F : 適応度

LCC : 2.3(3)で設定した LCC

λ : ペナルティ係数

IP_i : 部位 i の性能指数

3.2 GA オペレータの概要

(1) 交叉

個体群を構成する 2,000 の個体から、500 組の親個体を無作為に選定し、「一様交叉」を通じて 1,000 の新たな個体を生成する。一様交叉に用いるマスクビットパターンは 1 組の交叉ごとに無作為に設定する。

(2) 突然変異

局所解に陥ることを回避するために、1 世代ごとに上述の「交叉」で新たに生成された 1,000 の個体に対し、5%の確率で突然変異を起こす。突然変異は、個体の中にある遺伝子を 1 つ無作為に選定し、値を入れ替える。

(3) 淘汰

前世代の 2,000 の個体と、上述の「交叉」、「突然変異」を通じて新たに生成された 1,000 の個体を合計した 3,000 の個体を対象として淘汰する「連続世代 GA 方式」を用いた。淘汰の方法は、各個体の適応度 F を計算した後に、交叉した数(1,000 個体)に相当するまで適応度の高い個体から保存していく(エリート選択)。淘汰率は 0.67 となる。

(4) 収束条件

個体群に対し、交叉・突然変異・淘汰の GA 処理が完了した時点で 1 世代の処理が終了したことになる。このような世代処理を繰り返すことによって、個体群の適応度 F を高めつつ最適解を探索する。

GA 処理は 5,000 世代に到達するまで行った。GA 処理が終了した後に、個体群の中で最大適応度を示す個体が最終解となる。

なお、突然変異等に伴う探索解の変動が小さい場合、個体群の適応度の最大値、平均値が向上することを確認しつつ、ある世代数以上最大適応度が向上しないと判断できれば、終了できると考えられる。世代数と終了条件の問題については、今後の課題としたい。

4. 適用結果

4.1 検討ケース

GA の適用性を検証するために、以下の 3 つの検討ケースを設定し、それぞれの維持管理計画を策定した。

ケース 1: 各部位に着目して最適化を図る場合。1 つの部位のスケジュールを 1 個体とする(個体長 100)。

ケース 2: 各橋梁に着目して最適化を図る場合。1 つの橋梁を構成する 6 つの部位のスケジュールを 1 個体とする(個体長 600)。

ケース 3: 対象範囲にある全 10 橋に着目して、最適化を図る場合。60 ある部位すべてのスケジュールを 1 個体とする(個体長 6,000)。

4.2 適応度の変化

GA オペレータが機能すれば適応度 F は高まり、LCC は低下する。そこで、適応度の変化を見るために、横軸に世代数、縦軸に LCC をとり GA の進化過程を図化した。一例として、ケース 1 の結果のうち、劣化条件の最も厳しい部位(橋梁 04 の床版支承部)にかかる LCC の収束状況を図-9 に示す。

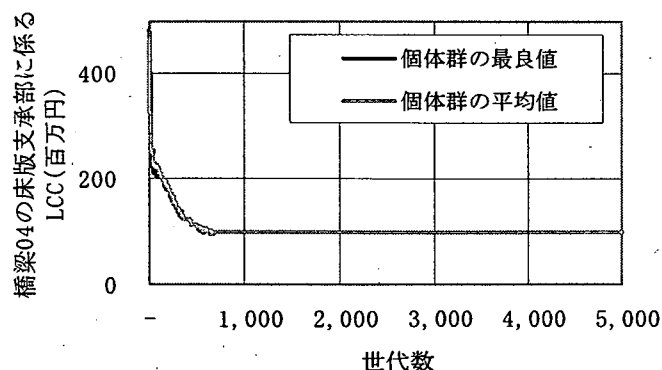


図-9 GA による進化過程(ケース 1)

この結果から次のことがいえる。

- ① 世代数の増加とともに、LCC は個体群の最良値、個体群の平均値のいずれも低下していくことがわかる。本研究で定義した適応度を高めるために GA オペレータが機能している。
- ② 1,000 世代目以降になると LCC の低下は停滞し、一定の値で推移していることから、GA 処理は収束したといえる。

ケース 2、ケース 3 の結果も同様の傾向にあった。

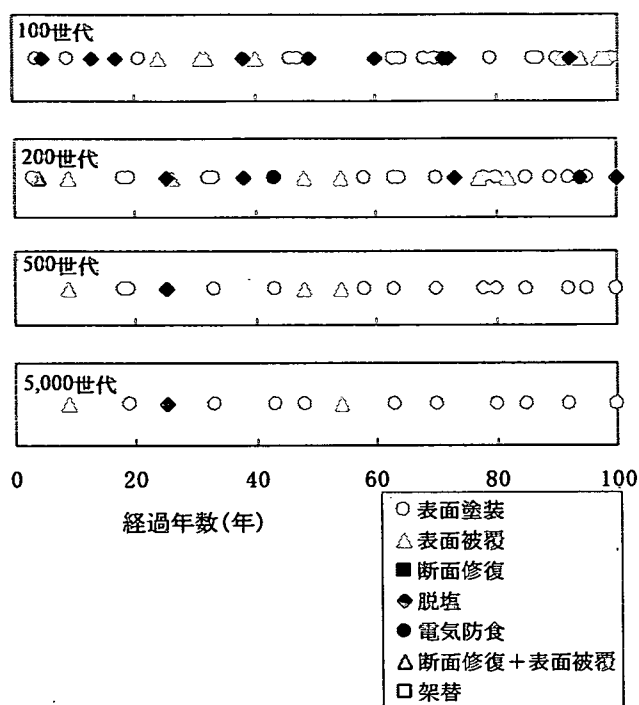


図-10 各世代における最良個体

4.3 最良個体に見られる GA の効果

(1) 部位に着目したときの効果

ケース 1 の結果の一例として、前節と同じ橋梁 04 の床版支承部について、100, 200, 500, 5,000 の各世代における最良個体を図-10 に示す。図は、横軸を経過年とし、この部位に実施する対策工法と施工時期を示したものである。世代の進行とともに不必要な対策が減少し、LCCが低下する様子が表現されている。

(2) 複数の部位に着目したときの効果

ケース 2 の結果の一例として、劣化条件の最も厳しい橋梁 04 について、最終世代における最良個体を図-11 に示す。図は、構成する 6 つの部位のスケジュールを並べて示している。

補修・補強を同時に実施し足場費用を共有できれば、費用を削減することができる。例えば、橋脚上部及び下部では、他の部位と同時に補修を実施していることがわかる。一方、床版支承部に実施する対策は同時に補修できるにもかかわらず、実施していない例も多い。この傾向はケース 3 の結果にも見られた。このように最適解に至っていないため、GA オペレータの条件を含め検討する必要がある。

5. まとめと今後の課題

部位単体に着目すれば、部位を個体としたケース 1 では妥当な解が得られた。

一方、複数の部位に着目した場合、6 つの部位を個体としたケース 2、60 の部位全体を個体としたケース 3 とともに、現状の GA 処理で収束していると考えられるが、足場兼用の効果が見られる部位と見られない部

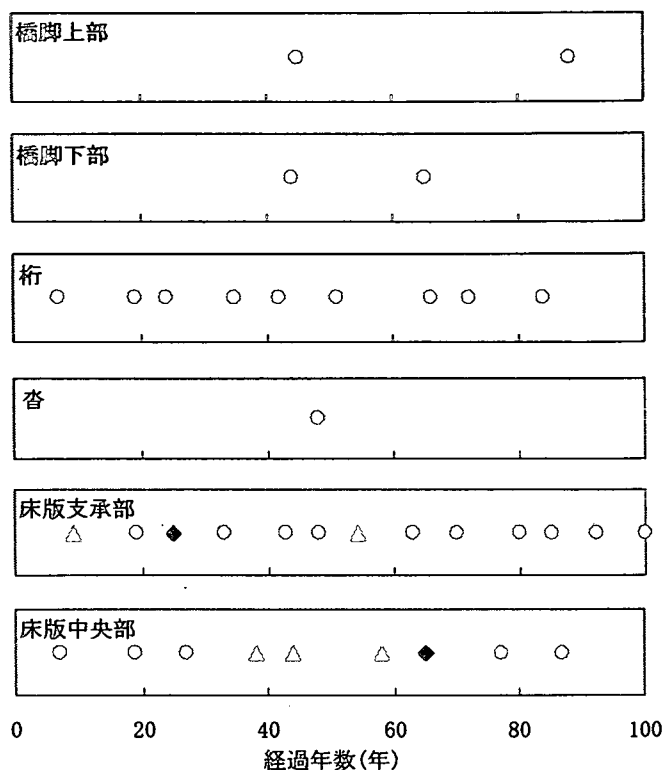


図-11 最終世代における最良個体

位が存在し、最適解には至っていないと考えられる。この 1 つの要因として、最適に近い解は、ほとんど無対策を繰り返すスケジュールであり、現状の GA オペレータではこのような解の探索が困難な構造となっている可能性がある。より最適な解を得るために、GA オペレータを検討するほか、ウィルス型遺伝子に着目した検討を実施中である。

また、本研究では収束条件には十分な世代数を設定したこともあり、多大な処理時間を要した。この 1 つの要因として、遺伝子記述方法の問題が挙げられる。実用性を考える上では、コンピュータ処理時間も重要な要素になる。この問題を解決するために可変長遺伝子に着目した検討を実施中である。

参考文献

- 1) 古田・杉本: 遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用, 森北出版, 1997.
- 2) 2001 年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編], 土木学会, 2001.
- 3) 平成 13 年度版 国土交通省土木工事積算基準, (財) 建設物価調査会, 2001.
- 4) 例えば, 最新土木工法年鑑 96 補修・補強の実践手法, 日経コンストラクション, 1996.