

論文 遺伝的アルゴリズムを用いたコンクリート構造物の ライフサイクルコスト最小化に関する研究

高橋 敏樹*¹ ・ 竹田 宣典*² ・ 十河 茂幸*³

要旨: コンクリート構造物の維持管理計画策定には、ライフサイクルコスト（以下 LCC）評価が必要不可欠なものとなりつつある。本研究では、塩化物イオンの拡散浸透予測を行ない、鉄筋位置での塩化物イオン濃度を制約条件とした遺伝的アルゴリズム（以下 GA）を用いて、最適維持管理計画を求める手法を提案し、ケーススタディーを行なった。その結果、1) GA を用いて LCC 最小化の選定が可能であること、2) LCC 最小化には高耐久性の初期建設および補修工法の適用が有利であることが考察された。

キーワード: ライフサイクルコスト, 遺伝的アルゴリズム, 塩化物イオン浸透予測

1. ライフサイクルコスト検討の必要性

コンクリート構造物は、その長期耐久性を期待され、多くの社会基盤施設に用いられている。しかし、高度成長期に建設された構造物の中には、補修や更新が必要なものも数多く存在し、また、厳しい塩害環境に置かれている構造物では、建設後数年で塩害を受けている事例も存在する。一方で、公共投資や民間投資の費用削減の流れは強く、特に建設費の削減が強調され、建設後の耐久性や維持管理費用に関する検討が十分行われていない場合もある。そこで重要となるのが構造物の供用期間全体での費用、LCC の検討である。本研究では、コンクリート構造物の材料劣化を指標として、供用期間で限界状態を超えない建設、補修、更新工法の組み合わせのうち、コスト最小となるものを、GA を用いて求める手法について検討した。

工法の種類と、実施時期により膨大な組み合わせパターンを持つ維持管理計画の中から、現実的な計算時間内で準最適解を求める手法として、組み合わせ最適化問題に適している GA を用いた。これを維持管理計画最適化に適用する考え方も広まりつつあり^{1), 2)}、本研究では、塩害の進行予測に長期海洋暴露実験データ³⁾を用い、また建設費用や補

修費用には実施工データを用いる解析を行なった。計算例を示し、GA により出力された最適維持管理計画の妥当性と、LCC 最小化に有利な工法に関して考察した。

2. ライフサイクルコストの算定手法

2.1 供用期間とコストの計算

本研究で LCC に含まれる費用は、初期建設費用、補修費用、更新費用である。供用期間は、ある構造物が取壊されるまでの期間ではなく、サービスを提供する期間として捉え、実施対策として構造物の更新も含めて考えることとした。

初期建設費用は、工事費総額を入力するようにし、補修費用は、単価に面積を乗じて計算した。

日常点検等の費用に関しては、その金額が建設費用や補修費用に比して小さいこと、また工法にそれほど影響されず、毎年一定の費用が加算されると思われることから、本研究では除外した。

2.2 限界状態

コンクリート構造物の塩害による劣化進行は図-1のように表現することができる。構造物が供用可能かという意味では、構造耐力が設計値以下となるまでは供用可能と考えることもできるが、

* 1 (株)大林組技術研究所 土木材料研究室 研究員 工修 (正会員)

* 2 (株)大林組技術研究所 土木材料研究室 副主任研究員 工博 (正会員)

* 3 (株)大林組技術研究所 土木材料研究室 室長 工博 (正会員)

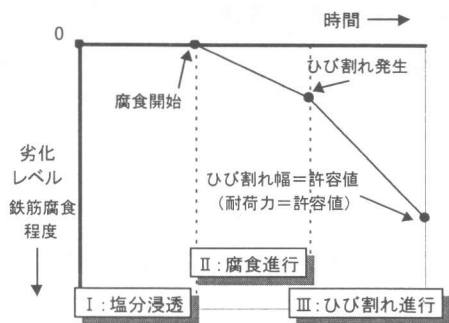


図-1 コンクリート構造物の劣化進行

この段階まで劣化が進行すると、さらに供用期間が残っている場合には、補修が困難なため、選択肢が更新のみになると考えられる。また、現状では構造物の材料劣化に伴う耐力の低下を精度よく予測することは困難であるため、本解析では、構造物の限界状態を「鉄筋腐食の開始時」、つまり鉄筋位置での塩化物イオン濃度が鉄筋腐食発生濃度に達したときとした。そのため、構造物の劣化指標は鉄筋位置での塩化物イオン濃度となり、劣化進行の予測は塩化物イオン浸透解析により行った。

2.3 塩化物イオン浸透解析

塩化物イオンの拡散は、式(1)で表現される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = Dc \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここで、 $u = u(x, t)$: 位置 x , 時刻 t での

塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

t : 時刻 (秒)

x : 表面からの距離 (cm)

Dc : 塩化物イオンの拡散係数 (cm^2/s)

この式を1次元の有限体積法で解き、鉄筋位置

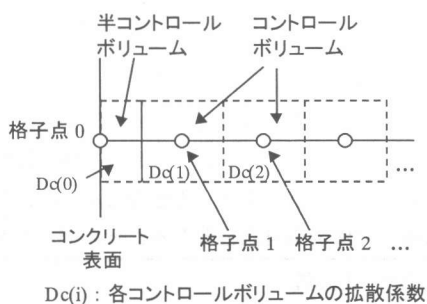


図-2 有限体積法の計算格子

での塩化物イオン濃度を時系列で求めた(図-2)。境界条件としては、コンクリート表面端部に半コントロールボリュームを設け、最端部の格子点の塩化物イオン濃度を表面塩化物イオン濃度とした⁴⁾。表面塩化物イオン濃度は、環境条件に応じて平成11年度土木学会RC標準示方書[施工編]に従い決定した。また、コンクリート内部側の境界条件は、十分離れた場所(コンクリート表面から20cm)で

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

とした。これにより、断面修復、表面塗装、脱塩の各補修工法の効果を表現でき、補修後の鉄筋位置での塩化物イオン濃度を予測することができる。

2.4 初期建設工法

初期建設工法の種類は、打放しコンクリート、表面塗装コンクリート、プレキャスト型枠工法とした。各工法の塩化物イオン拡散係数は、長期海洋暴露実験から求められた各種コンクリート種類やセメント種類ごと、環境条件ごとの、水セメント比50%の場合のデータを水セメント比に応じて補正して用いた。補正は、平成11年度土木学会RC標準示方書[施工編]にある水セメント比と拡散係数の関係から近似により求めた式(3)、式(4)によって行なった。

水セメント比 < 50% の場合

$$Dc = Dc_{50} \times 0.0124e^{\left(\frac{8.68 \times W/C}{100}\right)} \quad (3)$$

水セメント比 > 50% の場合

$$Dc = Dc_{50} \times 0.0016e^{\left(\frac{12.74 \times W/C}{100}\right)} \quad (4)$$

ここで、 Dc_{50} : $W/C=50\%$ の拡散係数 (cm^2/s)

表面塗装工法の場合は、塗装効果の持続期間を設定し、その期間内だけ表層部の半コントロールボリュームの拡散係数($Dc(0)$)を小さく設定することによりその効果を表現した。

2.5 補修工法

補修工法は、断面修復工法、表面塗装工法、脱塩工法とし、各工法の塩化物イオン浸透拡散におけるモデルを以下に示す。

(1) 断面修復工法

断面修復工法の特徴を表すパラメータとして、はつりとなるコンクリートの深さと、修復後のかぶりの厚さを用いた。断面修復を行なった場合の効果は、格子点の塩化物イオン濃度のうち、はつり深さまでに含まれるものを0にし、かぶりは修復後のかぶり厚さに設定することにより表現した(図-3)。また、用いる修復材に応じて修復後の塩化物イオン拡散係数を規定した。

(2) 表面塗装工法

初期建設工法と同様に、 $D_c(0)$ と、塗装効果の持続期間で表した。

(3) 脱塩工法

脱塩工法の特徴を表すパラメータとして、各格子点での塩化物イオン濃度の低減率と、脱塩限界濃度を用いた。脱塩工法の効果は、かぶり部分の塩化物イオン濃度の低減で表現し、鉄筋より内側の部分に関しては塩化物イオン濃度が低減されないとした(図-4)。また、脱塩工法を行なっても、塩化物イオンが残留することが指摘されており、この塩化物イオン濃度を脱塩限界濃度として設定

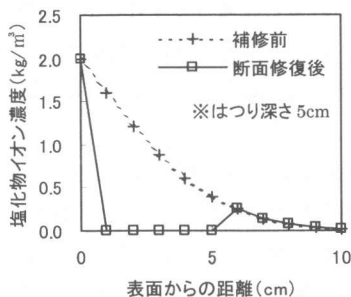


図-3 断面修復後の塩化物イオン濃度分布

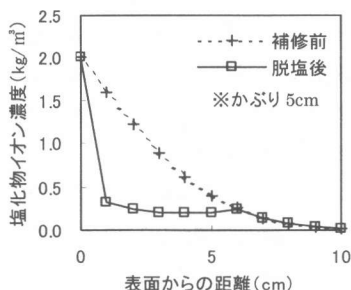


図-4 脱塩後の塩化物イオン濃度分布

した。本解析では塩化物イオン濃度が20%に低減されるとし、脱塩限界濃度は 0.2kg/m^3 とした。

3. 遺伝的アルゴリズムの適用

最適維持管理計画を求めるための本研究でのGAの適用方法に関して述べる。

3.1 遺伝的アルゴリズムのフロー

本研究で採用したGAのフローを図-5に示す。解析前のデータ入力では、まずLCCを計算する供用期間、環境条件、限界状態を入力する。次に、GAの中で選択される建設工法、補修工法、更新工法の候補を選択する。計算を開始すると、初期遺伝子集合を任意に作成し、それぞれの適合度を計算する。各適合度から、次世代の親遺伝子を選択し、交叉させて子遺伝子を生成する。これを1世代のルーチンとして設定した世代数まで計算し、全体で最も高い適合度を示した遺伝子を最適解として出力する。

3.2 遺伝子のコーディング

本研究において遺伝子の表現は図-6のように行なった。各数字はある年の実施工法を意味し、

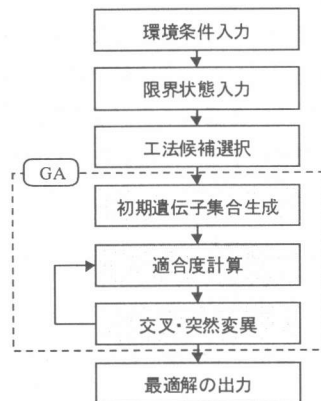


図-5 遺伝的アルゴリズムのフロー図

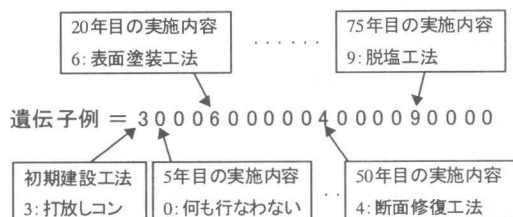


図-6 遺伝子の表現

数字の種類はそれぞれに割り当てられた工法を意味する。"0"は対策実施なしを意味する。本研究では、計算時間の短縮と、毎年補修を行なうような維持管理計画が有利となる可能性がほとんどないことから、一つの数字を5年間に対応させた。このとき、図-6の例は、工法3で建設し、20年目に工法6、50年目に工法4、75年目に工法9で補修（更新）をするという100年間の維持管理計画を表す。

3.3 適合度の計算

各遺伝子の数字列に従って塩化物イオンの浸透解析を行なう。補修（更新）を表す数字が出現したらその工法で補修（更新）を行ない、その施工費用をLCCに加算する。適合度は、全実施工法の施工費用合計の逆数としている。施工費用が小さいほど優れた維持管理計画であるので、適合度が大きいものほど優勢な遺伝子ということになる。ただし、塩化物イオン浸透解析の過程で、鉄筋位置での塩化物イオン濃度が限界値を超えたものは制約条件を満たさないで、ペナルティーを施工費用合計に加算することとした。

3.4 交叉方法

交叉方法にはルーレット方式による1点交叉と、エリート保存を採用した。全遺伝子の（適合度）^{1.2}の合計に占める、各遺伝子の（適合度）^{1.2}を、その遺伝子が親遺伝子として選択される確率とする（式（5））。

$$P(i) = \frac{S(i)^{1.2}}{\sum_{j=1}^n S(j)^{1.2}} \quad (5)$$

ここで、 $P(i)$: 遺伝子*i*が親として選ばれる
確率

$S(j)$: 遺伝子*j*の適合度

n : 遺伝子の固体数

乗数は、大きくするほど優勢な遺伝子ばかりが親として選択され、遺伝子集合が局所化する。そのため本研究では早い段階での遺伝子集合の局所化を避けるために、乗数として1.2を採用した。

突然変異確率は、小さな値を用いた場合に初期の局所化から遺伝子集合が抜け出せなかったため、

比較的大きい値である10%とし、各遺伝子に対して、任意の遺伝子座一つに関して、10%の確率で数字をランダムに変化させた。また、子遺伝子が重複した場合には、任意の遺伝子座の数字をランダムに変化させ、遺伝子集合の中に同一遺伝子が含まれないよう処理した。

3.5 解の出力

設定した世代数の計算が終了した時点で計算終了とし、最も適合度の高かった遺伝子が表す維持管理計画を最適解として出力する。

4. ケーススタディー

4.1 概要

GAを用いて最適維持管理計画を求めるケーススタディーの概要を示す。

対象構造物として、橋梁を考え、コンクリート体積を2000 m³、補修部位の面積を2000 m²とした限界状態は、鉄筋位置での塩化物イオン濃度が1.2kg/m³以上になったときとした。

実施工法の候補として、表-1の工法を用いた。表中の拡散係数は、飛沫帯におけるコンクリートの塩化物イオン拡散係数である。コストは、初期建設工法の打放し普通コンクリートを基準（100ユニット）とし、各工法の施工費用を比率で表した。補修は、施工単価に補修面積を乗じた施工費用を表示した。

塗装工法における表面部半コントロールポリウームの拡散係数は、塗装Aが 0.01×10^{-8} cm²/s、塗装Bが 0.005×10^{-8} cm²/sに設定した。塗装効果の持続期間は、塗装Aが20年間、塗装Bが30年間とした。構造物のかぶり厚は全て5cmとし、断面修復工法に関しては、はつり深さ、修復後のかぶり共に5cmとし、拡散係数の違いで断面修復Aと断面修復Bの2種類を用いた。

供用期間は100年間とし、環境条件は表-2のような3種類で検討した。

表-3のパラメータをGAに用いた。GAによる最適化問題は、探索空間が広い場合には厳密な意味での最適解が得られることはむしろまれで、最適解近傍には比較的容易に近づけるが、そこから

最適解に到達することが非常に困難といえる⁵⁾。
そのため、各環境条件での計算は5回ずつ行ない、
出力解の検証を行なった。

表－1 各種建設及び補修工法

種類	番号	工法名	拡散係数 ($\times 10^{-8}$ cm ² /s)	コスト (ユニット)
初期 建設 工法	1	打放し普通コンクリート	6.7	100
	2	打放し高強度コンクリート	2.7	101
	3	塗装 A＋ 打放し普通コンクリート	6.7	107
	4	塗装 A＋ 打放し高強度コンクリート	2.7	108
	5	塗装 B＋ 打放し普通コンクリート	6.7	115
	6	塗装 B＋ 打放し高強度コンクリート	2.7	116
	7	高耐久性プレキャスト型枠 コンクリート	0.6	108
補 修 工 法	1	断面修復 A	1.0	12
	2	断面修復 B	0.5	13
	3	塗装 A	補修前と同	9
	4	塗装 B	補修前と同	17
	5	断面修復 A＋塗装 A	1.0	16
	6	断面修復 B＋塗装 A	0.5	17
	7	断面修復 A＋塗装 B	1.0	24
	8	断面修復 B＋塗装 B	0.5	25
	9	脱塩	補修前と同	57
	10	脱塩＋塗装 A	補修前と同	61
	11	脱塩＋塗装 B	補修前と同	69

表－2 環境条件

環境条件	表面塩化物 イオン濃度 (kg/m ²)
飛沫帯	13.0
汀線付近	9.0
海岸線から 0.1km	4.5

表－3 GA に用いるパラメータ

固体数	50
世代数	200
選択方法	ル・レット戦略＋エリート保存
交叉方法	一点交叉
突然変異確率	10%

4. 2 計算結果

5 回の繰返し計算のうち、各環境条件下で適合
度が最大であった工法の組み合わせは表－4～6の
とおりである。塩化物イオン濃度と LCC のグラ
フを図－7、図－8に示す。

表－4 飛沫帯での最適解

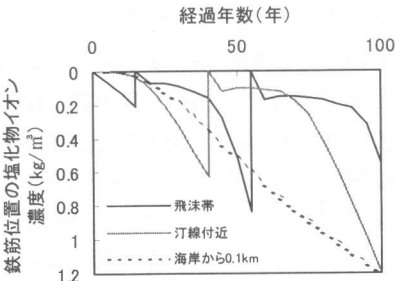
実施工法	種別	実施年
塗装 A コンクリート	建設	初期
断面修復 B＋塗装 A	補修	15
断面修復 B＋塗装 B	補修	55

表－5 汀線付近での最適解

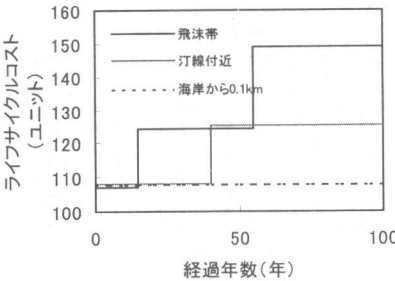
実施工法	種別	実施年
高耐久性プレキャスト型枠 コンクリート	建設	初期
断面修復 B＋塗装 A	補修	40

表－6 海岸から 0.1km での最適解

実施工法	種別	実施年
高耐久性プレキャスト型枠 コンクリート	建設	初期



図－7 鉄筋位置での塩化物イオン濃度



図－8 ライフサイクルコスト

いずれの最適解も、更新を含まない維持管理計
画を出力している。これは、更新費用が補修費用
に比べて2～10 倍程度になっているためで、更新
を含む遺伝子は淘汰された。

建設工法のプレキャスト型枠以外は、全て塗装
を含む工法が、建設・補修ともに選択されている。
これは、塗装を含まない工法では、塩化物イオン
の浸透が速く、補修回数が約2 倍にも増えてしま
うためであり、安価な補修（塗装を含まない断面
修復のみ）を繰返すと、高価な補修を用いる場合
より LCC が大きくなる結果となった。

脱塩工法に関しては、補修の選択肢に加えたが、
施工費用の高さから、淘汰される結果となった。

以上のことから、LCC を最小化する維持管理計

画として、以下の特徴が挙げられる。

- (1) 表面塗装コンクリートや、高耐久性プレキャスト型枠コンクリート等の耐久性の高い工法で建設する。
- (2) 断面修復と表面塗装を組合わせた工法で、少数回の補修を行なう。
- (3) 構造物の更新は行なわない。

4. 3 解のばらつきに関して

各環境条件ごとに 5 回の繰返し計算を行なったが、解のばらつきは図-9 のようであった。海岸から 0.1km の環境では、補修を含まずに 100 年間構造物を維持できるので、最適解の予測は容易であり、最適解として 5 回とも同一解が出力された。

環境条件が厳しくなるにつれて、補修選択のバリエーションが増えるので、出力解はばらつきを持つようになる。最小の LCC を 100% とすると、

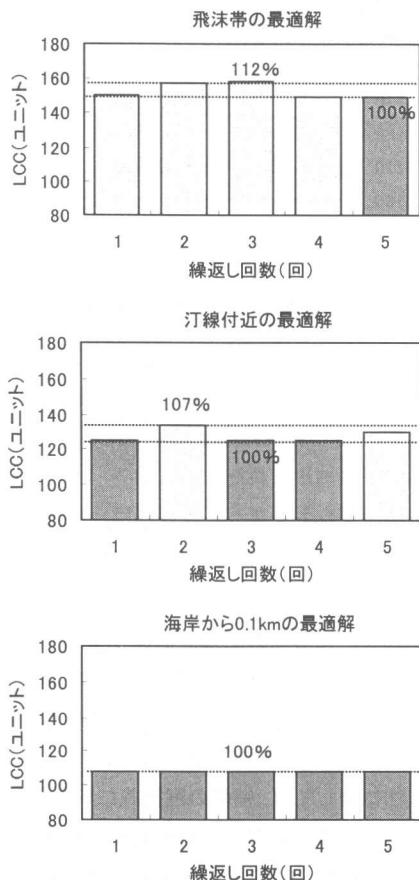


図-9 繰返し計算と解のばらつき

最大で 112% の解が出力されており、数回の繰返しでは、厳密解を出力するのは困難である。

しかし、いずれの解も塗装工法を主に用いたものであり、補修回数も最大で 3 回までに押さえられている。また、供用終了直前に補修を行なうようなパターンは出現していない。このため、出力される最適解は、厳密解の近傍までは近づいており、定性的には、LCC を最小化するには、高耐久性プレキャスト型枠や塗装工法の使用が有利であると考えられる。

5. まとめ

遺伝的アルゴリズムを用いた、最適維持管理計画の策定手法を示した。環境が厳しいほど、また計算する期間が長いほど最適解を予測することは難しくなるが、出力解からは、LCC 最小化のための工法選択が可能と考えられる。

また、最適解として出力される工法の組み合わせは、工法の効果とコストに応じて大きく変化するため、各初期建設・補修工法のモデル化の精度と、コスト積算の精度を上げてゆくことが今後実用化に向けて重要と思われる。

[参考文献]

- 1) 長井 宏憲, 兼松 学, 野口 貴文, 友澤 史紀: 遺伝的アルゴリズムによる RC 構造物の補修・改修最適化問題に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.1, pp.457-462, 2000.6
- 2) 宮本 文穂, 河村 圭, 中村 秀明: Bridge Management System(BMS)を利用した既存橋梁の最適維持管理計画の策定, 土木学会論文集, No.588/IV-38, pp.191-208, 1998.3
- 3) 竹田 宣典, 迫田 恵三, 十河 茂幸: 海洋環境下に 10 年間暴露した鉄筋コンクリートの経年変化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.753-758, 1996.6
- 4) スハス V.パタンカー, コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 森北出版
- 5) 北野 宏明, 遺伝的アルゴリズム, 産業図書