

## 鉄筋コンクリート構造物のライフサイクルコスト評価システムの開発

高橋 敏樹 竹田 宣典  
十河 茂幸

## Development of Life Cycle Cost Evaluation System for RC Structures

Toshiki Takahashi Nobufumi Takeda  
Shigeyuki Sogo

## Abstract

A Life Cycle Cost Simulation System is proposed that determines a construction, repair and reconstruction method, and the execution time of each method. Chloride ion penetration, steel-bar corrosion, carbonation and chemical deterioration are estimated. This paper summarizes the system and describes a case study of a structure under chloride ion attack. By applying this system, 1) a repair method and execution time can be chosen that minimizes LCC, 2) highly durable construction and repair methods have the advantage of minimizing LCC, and 3) a maintenance plan can be developed that minimizes LCC by applying GA.

## 概 要

塩化物イオン拡散浸透, 塩害による鉄筋腐食, 中性化, 化学的腐食の劣化予測を行ない, ライフサイクルコスト (以下 LCC) を最も小さくする建設, 補修, 更新工法およびそれらの実施時期を策定する LCC 評価システムの開発を行なった。本報では, LCC 評価システムの概要と, 塩害を受ける構造物のケーススタディーについて述べる。開発した LCC 評価システムを用いることにより, 1) LCC を考慮した構造物の補修時期や補修工法の選定が可能である。2) 耐久性向上工法の LCC 低減効果の評価が可能である。3) 遺伝的アルゴリズム (以下 GA) を適用して LCC 最小化の選定が可能であることが考察された。

## 1. はじめに

鉄筋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多く, 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, 特に初期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, RC 構造物の材料劣化を指標として, 照査期間内に限界状態を超えないような建設, 補修, 更新工法の組み合わせのうち, コストが最小となる計画を求める LCC 評価システムの開発を行なった。

## 2. ライフサイクルコスト評価システムの概要

本システムでは, Fig. 1 に示すように, 構造物の建設から, その建設工法の特성에応じて塩害, 中性化, 化学的腐食の各劣化予測を時系列で行う。その計算過程において, 補修あるいは更新の実施を決定する。補修実施の場合, 各補修工法をモデル化した補修効果をコンクリートの材料特性に反映し, 補修後の劣化予測を引き続き行う。更新の場合は, 更新時の建設工法のコンクリート材料特性をその後の劣化予測に用いる。このようにして照査期間まで計算を行ない, その期間内に行なった建設, 補修, 更新工法の費用総額を LCC とする。複数の計画に関して LCC を算定し, それらを比較することにより LCC を小さくするような最適維持管理計画の立案が可能となる。

建設工法, 補修工法およびそれら実施時期の組み合わせパターンは非常に膨大であるため, その中から LCC が最小となるものを計算により準最適計画として求める手法を付加している。この計算手法には, 組合せ最適化問題に適している GA を用いた<sup>1),2)</sup>。

### 3. ライフサイクルコストと劣化予測手法

#### 3.1 照査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、更新費用とした(式(1))。照査期間は、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(供用期間)としてとらえ、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較して小さいこと、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。

$$LCC = Z_I + \sum_{i=1}^n Z_{Mi} + \sum_{i=1}^m Z_{Ri} \quad (1)$$

ここで、 $Z_I$ : 初期建設費用  
 $Z_{Mi}$ : i 番目の補修費用  
 $Z_{Ri}$ : i 番目の更新費用

#### 3.2 劣化予測

##### 3.2.1 塩化物イオン浸透解析

塩化物イオンの浸透は拡散則に従うとし、式(2)の拡散方程式を用いる。

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

ここで、 $u = u(x,t)$ : 位置  $x$ , 時刻  $t$  での塩化物イオン濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $t$ : 時刻 (秒)  
 $x$ : 表面からの距離 (cm)  
 $Dc$ : 塩化物イオンの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

これを 1 次元の有限体積法で解き、鉄筋位置での塩化物イオン濃度を時系列で求めた。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<sup>3)</sup>(Fig. 2)。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、コンクリート表面から 20cm の位置で

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

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。

##### 3.2.2 塩化物イオンによる鉄筋腐食

塩化物イオンによる鉄筋腐食量計算に関しては、式(4)のように、酸素濃度の勾配とアノードとカソードの面積比を用いて鉄筋腐食速度を求める関数の考えを用いた<sup>4)</sup>。鉄筋腐食量

$R$  ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) はこれを積分して求めた。

$$Fr = \frac{Kr}{Ko} \cdot \frac{C}{A} \left( K \cdot Do \cdot \frac{dSo}{dx} \right) \quad (4)$$

ここで、 $Kr, Ko, K$ : 定数  
 $Do$ : 酸素の拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )  
 $So$ : 鉄筋位置での酸素濃度  
 $C/A$ : アノードとカソードの面積比  
 $C/A = \dots \cdot e^{-\dots \cdot t}$   
 $\dots$ : 係数;  $\dots = 10$   
 $\dots$ : 係数;  $\dots = 0.05$   
 $t$ : 経過年 (年)

##### 3.2.3 中性化

中性化の予測は、有効水結合材比から決まる中性化速度係数を用いた  $t$  則により計算する<sup>5)</sup>。中性化深さ  $dn$  は、

$$dn = \dots \cdot t \quad (5)$$

$$= 3.57 + 9.0 \times W/B \quad (6)$$

ここで、 $\dots$ : 中性化速度係数  
 $W/B$ : 有効水結合材比  
 $t$ : 経過年 (年)

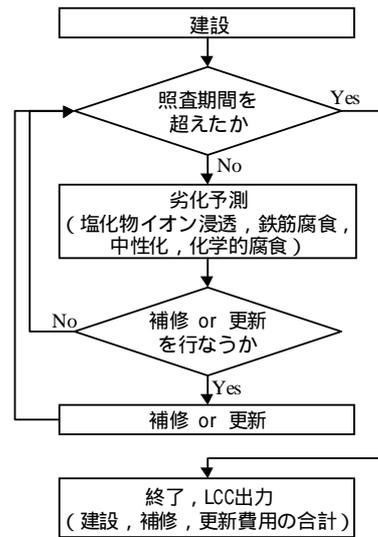
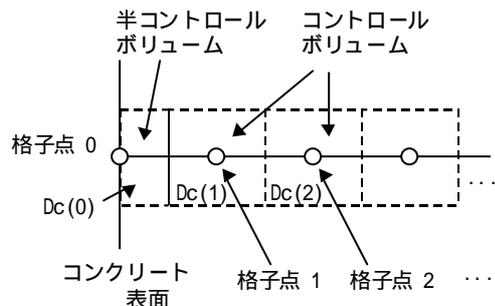


Fig. 1 本システムの計算フロー Flow Chart of LCC Evaluation System



$Dc(i)$ : 各コントロールボリュームの拡散係数  
 Fig. 2 有限体積法の計算格子 Grid of Finite Volume Method

と表される。

3.2.4 化学的腐食 化学的腐食の予測は、硫化水素濃度に比例して腐食速度を求める考えにより計算する<sup>5)</sup>。腐食速度は、

$$y = \alpha x + \beta \quad (7)$$

ここで、

y : 腐食速度 (mm/年)

α : 係数 1

β : 係数 2

x : 硫化水素濃度 (ppm)

と表され、係数 1 および 2 は設計者が選択可能とした。

3.2.5 限界状態 計算開始前に各劣化予測ごとの限界状態を設定する。塩化物イオン浸透解析では、鉄筋位置での塩化物イオン濃度を限界状態の指標とした。限界塩化物イオン濃度は設計者が任意に設定可能であるが、通常は平成 11 年度版土木学会コンクリート標準示方書 [施工編] に鉄筋腐食開始濃度として示されている 1.2 kg/m<sup>3</sup> を限界状態とした。

中性化の限界状態は、中性化残りの深さにより設定する。中性化深さが、(鉄筋かぶりから中性化残りを差し引いたもの) を上回った時に限界状態とした。

化学的腐食の限界状態は、中性化と同様に、化学的腐食残りにより設定する。化学的腐食深さが(鉄筋かぶりから化学的腐食残りを差し引いたもの) を上回った時に限界状態とした。

### 3.3 工法のモデル化

3.3.1 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<sup>6)</sup>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 年度版土木学会コンクリート標準示方書 [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 (8)、式 (9) によって行なった。

水セメント比 < 50% の場合

$$D_c = D_{c_{50}} \times 0.0124e^{\left(\frac{8.68 \times W/C}{100}\right)} \quad (8)$$

水セメント比 > 50% の場合

$$D_c = D_{c_{50}} \times 0.0016e^{\left(\frac{12.74 \times W/C}{100}\right)} \quad (9)$$

ここで、 $D_{c_{50}}$  : W/C が 50% の場合の拡散係数 (cm<sup>2</sup>/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))を小さくすることにより効果を表現した。

3.3.2 補修工法 補修工法は、断面修復工法、表面塗装工法、脱塩工法およびこれらの組み合わせとした。各工法の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、はつりとするコンクリートの深さと、修復後のかぶり厚さを用いた。塩化物イオン浸透解析における、断面修復を行なった場合の補修効果は、各計算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ゼロにし、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 (Fig. 3)。また、用いる修復材の種類に応じて修復後の塩化物イオン拡散係数を規定した。

鉄筋腐食量解析においては腐食量が、中性化においては中性化深さが、化学的腐食においては腐食深さがそれぞれゼロになるとした。

(2) 表面塗装工法 塩化物イオン浸透解析では、初期建設工法と同様に、最表面部の要素の拡散係数  $D_c(0)$  と、塗装効果の持続期間で表した。中性化、化学的腐食に関しては、劣化速度を決定する各係数を低減することとした。

(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

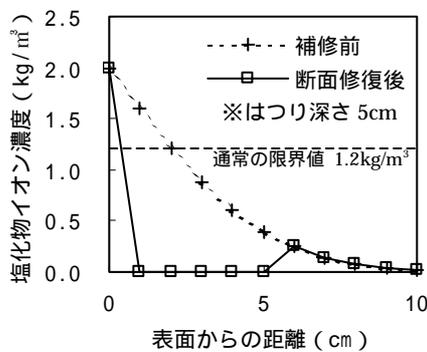


Fig. 3 断面修復後の塩化物イオン濃度分布  
Chloride Ion Density Distribution  
after Chipping and Patching

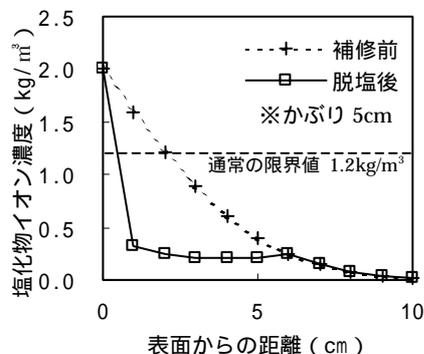


Fig. 4 脱塩後の塩化物イオン濃度分布  
Chloride Ion Density Distribution after Desalination

関しては塩化物イオン濃度が低減されないとした (Fig. 4)。また、脱塩工法を行っても、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<sup>3</sup> とした。

鉄筋腐食、中性化、化学的腐食に関しては、脱塩による補修効果はないとした。

#### 4. 計画最適化手法

建設、補修、更新工法および実施時期を組み合わせ、LCC を最小化する維持管理計画を求めるといふ最適化問題に GA を用いることとした。本研究における GA の適用方法に関して述べる<sup>7)</sup>。

##### 4.1 遺伝的アルゴリズム(GA)のフロー

本研究で採用した GA のフローを Fig. 5 に示す。解析前のデータ入力では、LCC を計算する照査期間、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。一つの遺伝子 (数字列) が一つの維持管理計画を表す。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。

##### 4.2 遺伝子のコーディング

本研究において遺伝子の表現は Fig. 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、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"は対策を実施しないことを意味する。本研究では、計算時間の短縮と、毎年補修を行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、Fig. 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。

##### 4.3 適合度の計算

各遺伝子の数字列に従って各劣化予測を行う。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、劣化予測の過程で、劣化が限界状態を超えたものは制約条件を満たさないので、ペナルティとして、非常に大きな値を施工費用合計に加算することとした。

##### 4.4 交叉方法

交叉方法としてルーレット方式による 1 点交叉と、エリート保存を併用した。全遺伝子の (適合度)<sup>1.2</sup> の合計に占める、各遺伝子の (適合度)<sup>1.2</sup> 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 (10))。

$$P(i) = \frac{S(i)^{1.2}}{\sum_{j=1}^n S(j)^{1.2}} \quad (10)$$

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: 遺伝子の個体数

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 10% とした。全子遺伝子から 10% の確率で突然変異する遺伝子を選択し、任意の遺伝子座一つの数字をランダムに変化させた。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。

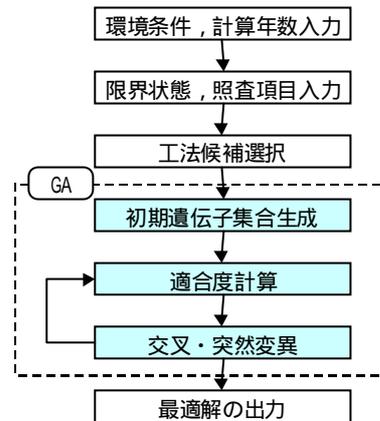


Fig. 5 遺伝的アルゴリズムのフロー図  
Flow Chart of the Genetic Algorithm

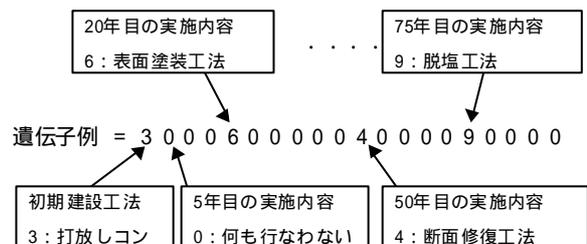


Fig. 6 遺伝子の表現  
Definition of the Genes

4.5 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。

5. 塩害を受ける構造物の LCC 評価のケーススタディー

5.1 維持管理計画の LCC 比較

海岸線から 100m の距離にある、表面積 2000m<sup>2</sup> の構造物について、照査期間 100 年間の LCC 算定を行なったケーススタディーについて示す。照査項目は塩害、限界状態は鉄筋位置での塩化物イオン濃度が 1.2kg/m<sup>3</sup> になったときとして、3 種類の維持管理計画について解析を行なった。各計画の初期建設工法、補修工法は Table 1 の通りである。各計画の解析結果を比較したものが Fig. 7, Fig. 8 である。打放しコンクリートにより建設し、断面修復により補修を行う計画では補修回数が 3 回となり、LCC が最も大きくなった。高耐久性プレキャスト型枠を用いた工法では、大規模補修は一度もなく、LCC が最も小さくなった。このように、耐久性向上工法を適用した場合の LCC 低減効果の評価が可能である。

5.2 最適維持管理計画

GA を用いて最適維持管理計画を求めた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 2000m<sup>3</sup>、補修部位の面積を 2000m<sup>2</sup> とした。劣化要因は塩化物イオン浸透を考え、限界状態は鉄筋位置での塩化物イオン濃度が 1.2kg/m<sup>3</sup> 以上になったときとした。

実施工法の候補は、初期建設工法として打放しコンクリート、塗装コンクリート、高強度コンクリート、高耐久性プレキャスト型枠コンクリートを、補修工法として断面修復、表面塗装、脱塩、およびこれらの組み合わせとした。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ボリュームの拡散係数は、塗装 A が  $0.01 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ 、塗装 B が  $0.005 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$  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、修復後のかぶり厚とも 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。照査期間は 100 年間とし、環境条件は Table 2 のような 3 種類で検討した。

Table 3 のパラメータを GA に用いた。GA による最適化問題は、厳密な意味での最適解が得られることはむしろまれ<sup>7)</sup> であるため、各環境条件での計算は、初期遺伝

子集合をランダムに変化させ 5 回ずつ行ない、出力解の検証を行なった。

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を Table 4, Table 5 に示す。塩化物イオン濃度と LCC のグラフを Fig. 9, Fig. 10 に示す。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た。これは、更新費用が補修費用に比べて 2 ~ 10 倍と非常に大きいため、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

Table 1 3 計画の工法  
Construction and Repair Method of each 3 Plans

計画	初期建設工法	初期建設工法の コスト (ユニット)
1	高耐久性プレキャスト型枠	1100
2	打放しコンクリート	1000
3	表面塗装コンクリート	1050

計画	補修工法	補修工法の コスト (ユニット)
1	目地の補修, 10 年毎	20
2	断面修復	170
3	断面修復 + 表面塗装	210

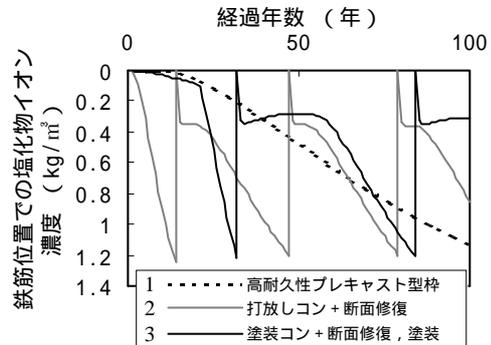


Fig. 7 鉄筋位置の塩化物イオン濃度の履歴  
- 複数の維持管理計画の比較 -  
History of Chloride Ion Density at Steel-Bar  
- Comparison between several Plans -

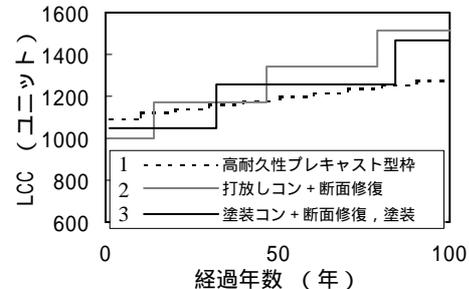


Fig. 8 LCC の履歴  
- 複数の維持管理計画の比較 -  
History of LCC  
- Comparison between several Plans -

Table 2 環境条件

Environmental Condition	
環境条件	表面塩化物イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> )
飛沫帯	13
汀線付近	9
海岸線から0.1km	4.5

Table 3 GA に用いたパラメータ

Parameters used for GA Analysis	
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%

Table 4 飛沫帯での最適解

Optimum Plan in Splash Zone		
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

Table 5 汀線付近での最適解

Optimum Plan at Seashore		
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

Table 6 海岸線から 0.1km での最適解

Optimum Plan at 0.1 km from Seashore		
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

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、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、少数回の補修を行う。
- 3) 構造物の更新は行わない。

## 6. まとめ

本 LCC 評価システムを用いて、耐久性向上工法を適用した場合の LCC 低減効果の評価や、GA を用いた LCC を最小化する維持管理計画の選定が可能である。GA による最適化は、環境が厳しいほど、照査期間が長いほど最適解の予測は難しくなるが、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。

算出される LCC は、工法の効果とコストに応じて大きく変化するため、LCC による維持管理計画の選定には、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重要である。

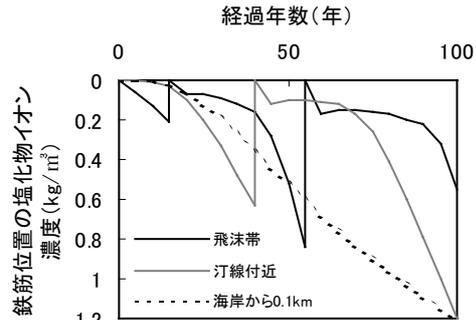


Fig. 9 鉄筋位置の塩化物イオン濃度の履歴

- 異なる環境条件下での最適解 -

History of Chloride Ion Density at Steel-Bar

- Optimum Plan under Different Environment -

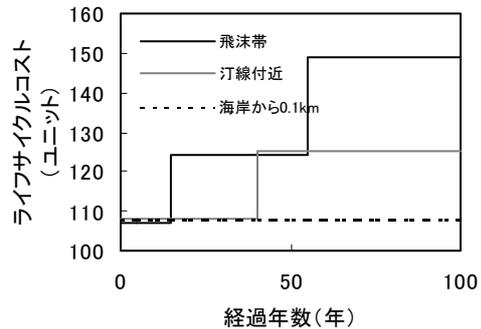


Fig. 10 LCC の履歴

- 異なる環境条件下での最適解 -

History of LCC

- Optimum Plan under Different Environment -

## 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/ - 38, pp.191-208, 1998.3
- 3) 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
- 4) 関 博, 松井 邦人, 松島 学, 金子 雄一, 田畑 裕: コンクリート構造の寿命予測に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol12, No.1, pp.569-574, 1990
- 5) 土木学会: 平成 11 年度コンクリート標準示方書[施工編], 2000.1
- 6) 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
- 7) 北野 宏明, 遺伝的アルゴリズム, 産業図書