

論文 遺伝的アルゴリズムによる RC 建造物の補修・改修最適化問題に関する研究

長井 宏憲^{*1}・兼松 学^{*2}・野口 貴文^{*3}・友澤 史紀^{*4}

要旨：建築物の耐久設計は、コストや資源の効率的利用に加えて、施主の要求、メンテナンスコンセプトなどを考慮する必要がある、多目的最適化問題として捉えられる。本研究では、「供用期間中に中性化が鉄筋に至らない」、「予算耐用年数の制約」という条件下で、メンテナンスコスト・回数が最小、といった複数の目的関数を設定し、メンテナンス計画の最適解集合を遺伝的アルゴリズムの適用により導出し、施主による意思決定の判断材料を提供することを目的とし解析を行った。

キーワード：遺伝的アルゴリズム、補修・改修計画、中性化・塩害の拡散モデル

1. はじめに

現在の日本の建設投資の 80%以上が新規建設投資であるといわれるが、この水準は欧米諸国に比べると著しく高く、今後、社会資本としての建築のストックの経過年数の増加や環境問題への対応から、新規建設が減少し、維持管理・更新に対する投資が増大するものと思われる。しかしながら、コンクリート建築物のライフサイクルマネジメント手法は未だ体系化されておらず、ライフサイクルコストの最適化がなされないため盲目的・場当たりの補修・改修が行われているのが現状である。

以上から維持管理・更新を含めた耐久性の管理手法が必要と考えられるが、その最適化の手法については対象となる探索空間が広大なため、必要な補修・改修方法を適宜選択し、適切な時期に執り行うことは非常に困難であり、今後、多変数の組合せの最適解を求める手法についての研究が必要であるといえる。

本研究では、RC 造建築物に一般的に起こりうる劣化現象のうち中性化と塩害の 2 つの拡散劣化現象を対象にして、仕上げ材・補修材が

どのような効果があるのかを評価し、耐久性、維持管理コストを考慮に入れた耐久設計手法の最適化を遺伝的アルゴリズムを用いて考える。

2. 補修・改修のモデル化

補修・改修の中性化、塩害に対する影響を正確に記述するためには、従来の \sqrt{t} 則では不十分である。すなわち、実際の補修は表面仕上げの塗り替えや、モルタル、コンクリート部の打ち直し、あるいは、コンクリートに対するアルカリ性付与など、単に、中性化深さや塩分浸透量のみでは、その効果を適切に評価することができない。そこで本研究では、RC 造建築物の劣化現象について中性化と塩害を対象とし、仕上げ材料を考慮に入れたコンクリートの劣化性状を表現する。そのため、補修・改修の効果を定量的に評価し表現することのできる劣化の予測式として、それぞれ拡散モデルを採用することにした。中性化、塩害の拡散方程式は有限要素法などにより、より正確で汎用性の高い

*1 東京大学 工学系研究科建築学専攻 (正会員)
 *2 東京大学助手 工学系研究科建築学専攻 (正会員)
 *3 東京大学助教授 工学系研究科建築学専攻 工博 (正会員)
 *4 東京大学教授 工学系研究科建築学専攻 工博 (正会員)

解析が行えると考えられるが、本研究ではGA(Genetic Algorithm)による繰り返し計算の付加を考慮して、差分法解析をとり入れた。中性化、塩害の差分解析モデルの概要を図-1に示す。

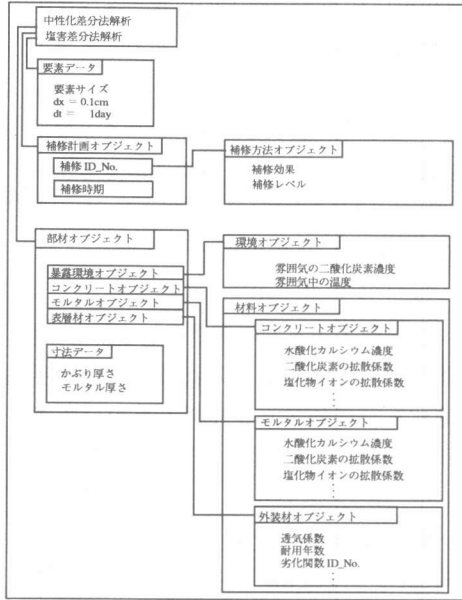


図-1 中性化・塩害差分解析プログラムの概要

2.1 中性化

コンクリート中の二酸化炭素の移動はFickの第一法則に従うと仮定し、かつ水酸化カルシウムと二酸化炭素との反応を一次反応と仮定すると、二酸化炭素の拡散方程式は式(1)のように表すことができる。さらに、梶田らは二酸化炭素と水酸化カルシウムの反応を考慮したコンクリートの中性化進行基本式を式(2)のように提案している¹⁾。ただし、水分の移動および濃度拡散によるコンクリート中の水酸化カルシウムの移動は考えず、コンクリートの中性化に伴う組織の緻密化による拡散係数の変化は考慮していない。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k \cdot C \cdot Ca \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k \cdot Ca_t = 0 \cdot C \cdot \exp\left\{-k \cdot \int_0^t C(\tau) d\tau\right\} \quad (2)$$

ここで、 $C=C(x, t)$: CO₂の濃度

$Ca=Ca(x, t)$: Ca(OH)₂濃度

D : CO₂の拡散係数

$Ca_{t=0}$: $t=0$ の時のCa(OH)₂濃度

k : Ca(OH)₂とCO₂との反応速度定数

2.2 塩害

塩化物イオンが内部に浸透・拡散していく過程も二酸化炭素の拡散同様、Fickの拡散法則を適用することができる。拡散係数一定でコンクリート表面における塩化物イオン濃度も一定とすると、式(3)のような拡散方程式で表すことができる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

ここで、 $C=C(x, t)$: 塩化物イオン濃度

D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数

2.3 仕上材のモデル化

実構造物の耐久性を考慮する上で、仕上げ材の効果を検討することは重要である。特に、実際の補修は、表面仕上げの美観劣化に伴う塗装の塗り直し等が中心で、その透気性状を考慮したモデルを提案する。

(1) モルタル部

モルタル部は、コンクリート部と同様に、二酸化炭素と塩化物イオンが拡散していくモデルを採用した。モルタルの拡散係数、反応速度係数に関しては和泉式、岸谷式といった \sqrt{t} 則との比較により検討している。

(2) 表面仕上材

仕上材料は、本研究では塗材・吹付け材を取扱い、中性化では外気の二酸化炭素の何%が透気するかで、塩害では表面塩化物イオン量の何%が浸透するかで表現した。

また、仕上材料は経時的に劣化するものとして、透気・浸透係数が時間とともに大きくなる

ようにモデル化した。表面塗装直後の状態（初期値）で、透気・浸透係数が最小で、時間の経過に伴い二次関数的に大きくなるものとして、それぞれの耐用年数が経過すると100%透気・浸透状態になり、表面塗装の効果がなくなるものとした。

2.4 補修・改修の表現

補修方法の水準は、以下の3水準とした。

①表面塗装の塗り直し

初期塗装材と同一の塗装を施すとし、それぞれの表面仕上材の透気、浸透係数の初期値に戻す。

②モルタルはつりとり、塗り直し

モルタル部の水酸化カルシウム量、塩化物イオン量を初期値に戻し、表面塗装の性能も初期値に戻す。

③コンクリートはつりとり、打ち直し

モルタル、コンクリート部分の水酸化カルシウム量、塩化物イオン量を初期値に戻し、表面塗装の性能も初期値に戻す。

図-2にこれら補修・改修の表現を示す。

また、図-3と図-4に、以上の拡散モデルの解析例を示す。

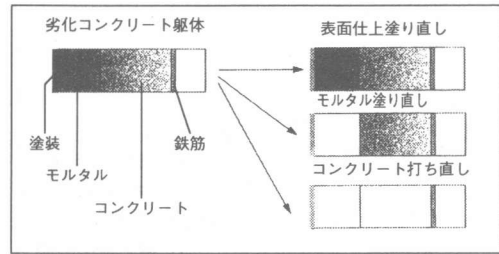


図-2 補修・改修の表現

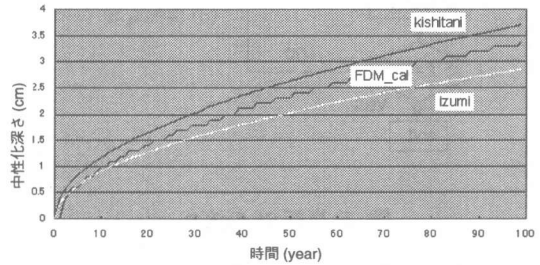


図-3 既往の研究（ \sqrt{t} 則）との比較

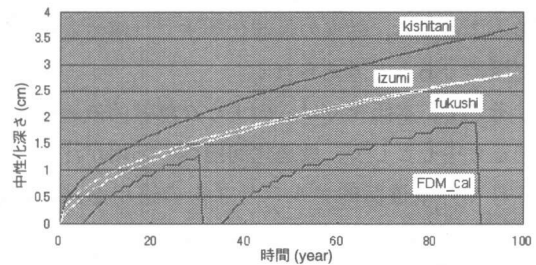


図-4 補修をした場合の中性化差分析

3. 遺伝的アルゴリズム

3.1 最適化手法の概要

最適化 (optimization) 問題は以下のような数学モデルとして定式化される。

「与えられた制約条件 (constraint) のもとで、目的関数 (objective function) とよばれる望ましさの尺度を表わす関数が最小または最大となるような決定関数 (decision variable) の値を見つける」

複数の決定変数を n 次元ベクトル x で表わすと、最適化問題は次のように書くことができる。

目的関数: $f(x) \rightarrow$ 最小 (or 最大)

制約条件: $x \in S$

制約条件 $x \in S$ を満たす x を上記の問題の実行可能解といい

$$f(x^*) \leq f(x) \quad (x \in S)$$

を満たす実行可能解 $x^* \in S$ を最適解という。

最適化問題は変数、目的関数、制約条件の種類によって、分類される。変数に関しては、変数が連続的な実数値をとる「連続的最適化問題」、離散的な数値をとる「離散的最適化問題」に大別される。特に後者は、組合せ的な性質を表わすことが多いので、「組合せ最適化問題」ともよばれる。

本研究で扱う補修・改修計画の最適化問題は、塗装の水準を含む、補修・改修方法の組み

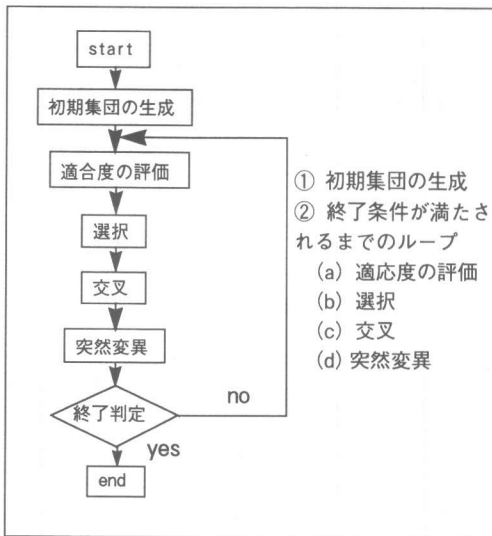


図-5 単純 GA の流れ

合わせ最適化問題で、離散的、不連続、非線型の性質を合わせもち、探索する解空間が広大であることから、従来の最適化手法では解くことが困難であると考えられる。

そこで、本研究ではこのような離散的最適化問題を中心として、最適化問題への応用が注目されている遺伝的アルゴリズムの適用を試みた。

3.2 遺伝的アルゴリズムの概要

遺伝的アルゴリズム（以下 GA）は、自然界において環境に適合した個体（個体群）が生き残り進化していく過程を、遺伝子の複製・選択・淘汰として捉え模倣した最適化手法で、1975年に John Holland の「Adaptation in Natural and Artificial Systems」において導入された、確率的探索・学習・最適化の一手法である。近年のコンピューターテクノロジーの発達に伴い、主に組み合わせの最適化（探索と表現されることが多い）問題を中心として工学分野全般にわたり広く応用されている。

GA では、制約条件を環境条件、目的関数を環境に対する適合度とみため、最適な個体（解）あるいは個体群（解空間）を探索する。最適化を目的とする情報（表現型：phenotype）

を、0・1 の配列からなる遺伝子（遺伝子：genotype）として表現し、この遺伝子に、選択（selection）、交叉（cross over）、突然変異（mutation）等の遺伝的操作（operation）を適用し表現型の最適化を行う。表現型は、環境内での発達に伴う大域的な行動や構造の発現を表わす。環境に応じて表現型から適合度（fitness value）が決まり、そのため適合選択は表現型に依存する。

解の候補は、遺伝子型として染色体（chromosome）に 1 次元的に表現され、個体（individual）の集合としての各世代は、遺伝的操作を施される。

実際に GA を最適化問題に適用する場合には、以下のような処理手順（図-5）に沿って行われる。

本研究では単純 GA を基本とし、ランダムに個体を選ばずに個体群の中で最も適応度の高いものを強制的に残すエリート保存戦略をとった。

3.3 補修改修計画最適化問題への遺伝的アルゴリズムの適用

(1) 制約条件と目的関数

【制約条件】

- ① 補修・改修を伴う中性化の進行は、前述の中性化拡散モデルに従うとする。
- ② 補修・改修の前後で、構成材料（コンクリートオブジェクト、モルタルオブジェクト、表層材オブジェクト）の特性は変化しない。
- ③ 環境条件は解析期間で一定とする。
- ④ 中性化では供用期間100年間で中性化深さが 2.0cm を超えないこととする。

【決定関数】

決定関数は 100 年間にわたる補修・改修計画とする。補修間隔の水準は 5 年とし、改修の水準は前述の 3 水準と補修なしとする。また、目的関数の制約から、最大補修回数は 8 回とした。

【目的関数】

評価関数は、各維持管理・補修計画の総コストで評価される。価格については「積算資料」(99年10月版)を参照した。評価関数の算定は、コストの逆数を用いて式(4)のように表現した。なお、評価値は値が高いほど適応度が高いものとする。

$$f = T_L / ((c + I)T_t) \quad (4)$$

ここで、 f ：評価値

T_L ：個体の評価関数

T_t ：目標供用期間

c ：総コスト

以上の条件下で、コスト最小の維持管理計画を導出することが本研究の目的となる。

表層材 ID No.	補修 ID No.	補修間隔	補修 ID No.	補修間隔	補修 ID No.	補修間隔
5bit	2bit	2bit	2bit	2bit	2bit	2bit
表層材	0: 補修なし	0.5年					
25水準	1: 表層材補修	1: 10年					
	2: モルタル補修	2: 15年					
	3: コンクリート補修	3: 20年					

図-6 遺伝子コーディング

(2) 遺伝子コーディング

遺伝的アルゴリズムでは、遺伝子は、解析の対象となる最適化問題の決定関数を1対1で表現しなければならない。(1)の決定関数を表現するため、補修計画のタイムテーブルを補修間隔と補修方法の2つの情報を1セットとし、4ビットを与え最大32ビットの遺伝子とした。4ビットのうち最初の2ビットは補修間隔、後半の2ビットは補修方法とした。

(3) オペレーター

単純GAを基本として、選択交配を取り入れたエリート保存戦略を用いた。これにより集団中で最も適応度の高い個体

をそのまま次世代に残すことができる

交叉方法は、評価値に従って、ランダムに選ばれた親遺伝子をもとに、ランダムな位置の遺伝子座の値を入れ替える、ルーレット選択、一様交叉を用いた。突然変異は確率0.01%で、突然変異の発生した遺伝子の値を反転させるものとした。(0→1, 1→0)

(4) 収束判定

遺伝的アルゴリズムは確率的探索方法であるため、得られた解が真の最適解かどうかは必ずしもはっきりとしない。

また、進化の過程をどの時点で終了するかは判定は困難である。そこで、本研究では、各遺伝子座がどの程度収束しているかを判定するため、バイアス判定による収束判定を取り入れた。また、いわゆるGAだまし問題を可能な限り回避するため、一度収束した解に対してすべての遺伝子座を確率0.5で反転させ再度解析を行うことで、より良い最適解の探索を行った。

4. 解析結果

バイアス判定による突然変異オペレーターの導入と収束状況、最大値、平均値の関係を図-7に示す。

bt はバイアス値を示し、大きいほど収束近づいていることを意味している。図-7より、すでに20世代目程度でいったんの収束を見てい

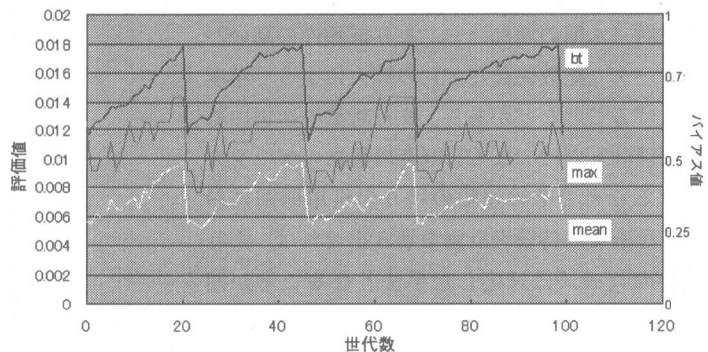


図-7 バイアス判定による突然変異オペレーターの導入と収束状況、最大値、平均値の関係

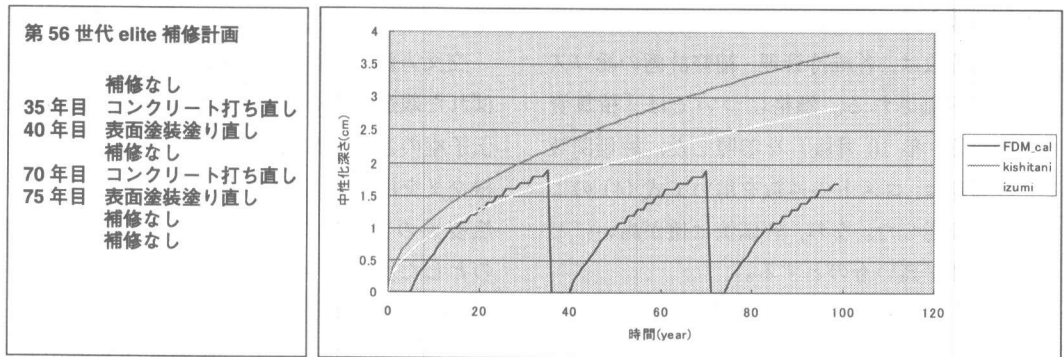


図 - 8 最適補修計画

ることがわかる。しかしながら、評価値の最大値を見てみると、20 世代目の収束後の突然変異で、評価値が最大だった遺伝子はいったん淘汰されている。その後、ふたたび 60 世代目で同様の評価値を持つ遺伝子が現れているが、20 世代目に見られたものからの解の改善は見られなかった。

100 世代の解析を通じてもっとも評価値の高かった最適補修計画を図-8 に示す。

前述の制約条件を満たしつつ、コストを最小に設定していることがわかる。

特に、この問題設定の場合、これ以外の解は考えにくく最適解が選ばれたものと考ええる。

5. まとめ

このように、GA を用いて最適な維持管理計画を導ける可能性を示した。

今後の課題としては仕上材の種類についての検討（水準の増加）や、より信頼性の高いパラメータ（拡散係数など）の導入によって精度を上げることなどがある。また新築の建物の維持管理計画だけでなく、既存の建物のデータを調べることでその建物の残りの供用期間における最適な維持管理計画を導き出せれば、より社会のニーズに対応した手法となることが期待できる。

[参考文献]

- [1] 梶田佳寛, 柵野博之: コンクリートの中性化進行予測モデル, コンクリート工学論文集, pp125-133, 1991.1
- [2] 日本コンクリート工学協会: 反応モデル解析研究委員会報告書 (I), 1996
- [3] 平野広美: 遺伝的アルゴリズムプログラミング, パーソナルメディア, 1995
- [4] David E. Goldberg: Genetic Algorithms, Addison-Wesley Publishing Company, 1989
- [5] 最適化ハンドブック
- [6] 伊理正夫ほか監訳: 最適化ハンドブック, 朝倉書店, 1995