免疫的アルゴリズムによるRC建築物の中性化に対する 維持保全計画最適化に関する研究

OPTIMAL MAINTENANCE PLAN OF RC BUILDING DAMAGED BY CONCRETE CARBONATION USING IMMUNE ALGORITHM

邱 建 國*, 兼 松 学**, 野 口 貴 文***, 長 井 宏 憲****

Chien-Kuo CHIU, Manabu KANEMATSU, Takafumi NOGUCHI
and Hironori NAGAI

This paper shows deterioration models due to carbonation in consideration of uncertainty to estimate the initiation and the rate of corrosion, and to analyze the structural capacity and serviceability of RC building, i.e. shear capacity, bending strength and width of severe cracking or spalling of columns and beams with corroded reinforcing bars based on simple formulas formed through the past experiments. Then, the failure probability due to earthquake, the probability that severe cracking or spalling will occur and the deterioration risk of deteriorated building in subsequent years from construction can be evaluated by probabilistic method. By applying immune algorithm to minimization of life-cycle cost including the deterioration risk, the optimal maintenance plan of reinforced concrete buildings can be found and a case study is finally conducted to prove this system.

Keywords : Deterioration risk, carbonation, Immune algorithm, Minimizing LCC, Failure probability, Repair, Retrofit
劣化リスク、中性化、免疫的アルゴリズム、LCC 最小化、破壊確率、補修、補強

1. はじめに

中性化や塩害などにより鉄筋が腐食した構造部材は、腐食程度や腐食要因などの詳細調査に基づき、適切な補修が施されることが一般的である。しかし、構造部材の将来的なリスクを定量的に分析し、損失を最小限に抑える手法や最適な補修・補強計画を提案するための研究は少ない。このため、頻繁に地震にみまわれる日本においては、構造性能及び使用安全性能に基づき建築物の耐久性・寿命を検討し、劣化リスクを含むライフサイクルコスト（以下、LCC）を最小化する補修・補強方針を評価するシステムが期待されている。

補修・補強計画の最適化手法については、対象となる探索空間が広大なため、必要な補修・補強水準を連続的な解空間の中で適宜設定し、適切な時期に行うことは非常に困難であることから、多くの研究¹⁾²⁾³⁾では多変数の組合せの最適解導出手法として有効と考えられる GA（Genetic Algorithm）の適用が試みられてきた。しかし、実際の建築物の維持保全計画を定める場合、単に大域的最適解が要求されるだけではなく、所有者の意思を考慮した実現可能で評価の優れた他の準最適解も重要になる場合も少なくない。このような計画最適化問題に対し、免疫的アルゴリズム⁴⁾（Immune Algorithm；以下、IA）は独自の調節機構を有していることから、一つの解に収束することなく複数の準最適解を一度に探索できる能力が示されていて、多様な複数の解を得る手段として注目され始めている。そこで、本研究では解の探索に IA を用い、中性化に伴うリスク評価を含めた LCC を最小化する維持

保全計画構築手法を提案することを目的とした一連の研究を行った。

まず、耐震安全性を想定した場合の中性化に伴う劣化リスク評価手法を提案する。RC 建築物の中性化に伴う劣化リスク（図 1）の中には、再現期間 500 年の地震動に対する損失コスト（構造性能評価）及び再現期間 100 年の地震動に対するコンクリート剥離による損失コスト（使用安全性評価）が含まれる。さらに、IA により劣化リスクを考慮に入れた LCC（初期建設費用、補修・補強費用、地震被害損失）を最小化する補修・補強計画最適化システムを構築する。最後に、いくつかのケーススタディーを行い、GA と IA による解を比較し、維持保全計画最適化問題に対する IA の特性と有効性を検討する。

図 1 劣化リスクの計算フロー

* 東京大学大学院工学系研究科建築専攻 大学院生・工修
** 東京理科大学理工学部建築学科 講師・博士(工学)

*** 東京大学大学院工学系研究科建築専攻
准教授・博士(工学)

**** 東京大学大学院工学系研究科建築専攻 助教・博士(工学)

Graduate Student, Dept. of Arch., Graduate School of Eng., The Univ. of Tokyo, M. Eng.
Junior Assoc. Prof., Dept. of Arch., Faculty of Science and Technology, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Arch., Graduate School of Eng., The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

Research Assoc., Dept. of Arch., Graduate School of Eng., The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

2. 劣化モデル

2.1 中性化

鉄筋周囲のコンクリートの中性化に伴い、空隙水の pH が低下すると、不動態皮膜が破壊され、最終的には鉄筋腐食に繋がり、構造物の耐久性を損なう現象が起きる。そこで、既往の研究⁹⁾を基に、中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食過程をモデル化した。

(1) 潜伏期

潜伏期は中性化の影響による鉄筋腐食が生じ始めるまでの期間とした。コンクリートの大きに接する面の平均中性化深さ (C , mm) は下式により計算する。

$$C = A\sqrt{t} \quad (1)$$

A : 中性化速度係数, t : 材齢

既往の研究⁹⁾を参考に、本研究では施工及び環境のばらつきに伴う中性化速度係数の変動係数を 45% と設定し、対数正規分布を仮定した。鉄筋のかぶり厚さは、既往の調査結果⁷⁾を基に、その変動係数を 20% と設定し、対数正規分布を仮定した。一般に、鉄筋が腐食し始めるときの限界中性化深さは、室内外の条件差により異なることが知られているが、本研究では室内外とも限界中性化深さは鉄筋位置に等しいと設定し、以上の不確実性に基づき、モンテカルロ法で最外側鉄筋の鉄筋腐食発生確率を計算し、図 2 のように鉄筋腐食発生確率が 10% を超過した時点で腐食し始めると考えた。

(2) 進展期及び加速期前期

進展期は鉄筋の腐食開始からコンクリート表面に腐食ひび割れが生じるまでの期間、加速期前期は腐食ひび割れ発生からコンクリートの剥離が生じるまでの期間とした。既往の調査⁸⁾により剥離が生じるひび割れ幅は 0.5mm-1.0mm 以上であるので、本研究では進展期及び加速期前期のひび割れ幅は 0.5mm 以下とし、1.0mm 以下とし、1.0mm を超える場合は加速期後期と設定した。なお、既往⁹⁾の研究に基づき、進展期と加速期前期の腐食速度には大差がないと判断し、腐食速度を 0.06%/年 (重量減少率) とし、変動係数 50%⁹⁾の対数正規分布に従うものと仮定した。

図 2 鉄筋腐食発生確率の計算

(3) 加速期後期

加速期後期 (ひび割れ幅は 1.0mm 以上) 以降においては、かぶりコンクリートは著しく損壊し鉄筋腐食に対する保護能力は、ほとんど失われると想定される。下式によって激しい剥離が生じる鉄筋腐食量を算定し、加速期後期の開始時間を評価することとした。

$$w_c = 0.141 \exp(1.078d/\phi) \times x \quad (2)$$

$$r = \frac{400w_c}{\rho_s \phi_o} \quad (3)$$

w_c : 鉄筋単位表面積あたりの腐食反応に消費された鉄筋量 (mg/mm²)、 x : ひび割れ幅 (mm)、 d : 被り厚さ (mm)、 ϕ : 鉄筋径 (mm) (ϕ_o : 元の鉄筋径)、 ρ_s : 鉄の密度 (7.85mg/mm³)、 r : 腐食による重量減少率 (%) (鉄筋の腐食量)

本研究では、文献 5 に従い腐食速度は裸鋼材の腐食速度と同一と推測して、0.14%/年 (重量減少率) とし、変動係数 50% の対数正規分布に従うものと仮定した。

2.2 中性化抑制効果の評価

本研究では、構造体及び部材に仕上げ材が施されている場合、仕上げ材の中性化抑制効果及びその持続性を考慮し、中性化深さの算定を行った。セメント系仕上げ材の場合、仕上げ材自身の中性化が進行し、その後躯体コンクリートの中性化が始まると考えられている。その抑制効果は、等価かぶり厚さの考え方¹⁰⁾で式 (4) のように評価される。タイルの場合¹⁰⁾は式 (5) を用いるものとした。また、高分子混入系仕上げ材の場合、紫外線や風雨により仕上げ材の劣化が進行し、徐々に中性化抑制効果が失われ、文献 11)、12) に基づき、式 (6)~式 (8) のように中性化抑制効果とその持続性を評価し、特に樹脂塗膜の場合は、式 (9) のように計算する。ただし、鉄筋が腐食し始めた後の腐食速度は前述と同じように仮定した。

$$C = A\sqrt{t} - M_{eq} \quad (4)$$

$$C = A \times S \times \sqrt{t} \quad (5)$$

$$C = A(\sqrt{t + R^2} - R) \quad (6)$$

$$C_i = A [\sqrt{t_{i-1}^2 + \Delta t + (R'_{i-1})^2}] - (R'_{i-1}) \quad (7)$$

$$t'_{i-1} = (C_{i-1}/A + R'_{i-1})^2 - (R'_{i-1})^2 \quad (8)$$

$$R'_{i-1} = T_r \times 0.135 \times e^{-0.090t_{i-1}} \quad (9)$$

条件: $\Delta t=0$, $C_0=0$, $t_0=0$

M_{eq} : 等価かぶり厚さ、 S : 中性化抑制効果の係数、 C_i : ステップ i での中性化深さ (mm)、 t'_{i-1} : ステップ $i-1$ での見かけ材齢 (年)、 R'_{i-1} : ステップ $i-1$ での中性化抵抗 (年^{1/2})、 t'_{i-1} : ステップ $i-1$ の仕上げ材の劣化材齢 (年)、 T_r : 樹脂塗膜厚さ (μ m)

3. 破壊確率及び剥離確率の評価

3.1 柱のせん断耐力の評価

せん断設計では、せん断補強筋のトラス作用により伝達されるせん断力と、せん断補強筋の関与しないアーチ機構で伝達されるコンクリートの負担するせん断力が考慮されている。本研究では、この理論を用い、既報²⁾のように鉄筋が腐食した RC 部材の付着破壊発生時のせん断耐力 (V_{bu}) と補強筋降伏時のせん断耐力 (V_u) を評価する。

3.2 柱の曲げ耐力の評価

曲げ終局強度については、平面保持を仮定した塑性曲げ理論¹³⁾が利用される一方で、略算式 (式 (10)) もよく利用されている。本研究では、これらの式と腐食鉄筋の降伏点の評価式¹⁴⁾ (式 (11)) を用い、鉄筋が腐食した柱の曲げ耐力を評価する。

$$M_u = 0.8a_t \sigma_y D + 0.5ND(1 - \frac{N}{bD\sigma_B}) \quad (10)$$

$$\sigma_y = \sigma_{y0} (1 - 2.17r / 100) \quad (11)$$

柱の曲げ耐力式の適用は、 $0.4bD\sigma_B \geq N > 0$ の時、 b : 部材幅 (cm)、 σ_B : コンクリート圧縮強度 (N/mm²)、 D : 部材のせい (cm)、 N : 柱軸方向力 (N)、 a_t : 引張主筋断面積 (mm²)、 σ_{y0} : 引張主筋の降伏点強度 (腐食のない場合) (N/mm²)

3.3 セン断耐力に対する要求水準の設定

本研究では、再現期間 500 年の地震動 (定常ポアソン過程、年間超過発生確率は 0.2%) に対応する地震荷重でのせん断力 (Q_E) を割増しし、鉛直荷重時せん断力 (Q_L) と合成した値を要求水準 (式 (12)) として設定した。

$$Q_{DS} = Q_L + \alpha \times Q_E \quad (12)$$

α : 割増係数、階数が 4 以下の建物では 2 以上、7~8 階程度のものでは 1.5 程度まで低減できる¹⁵⁾

3.4 部材の構造性能評価指標及び破壊確率

前述のように定めたせん断力 (Q_{DS}) に基づき、式 (13) と式 (14) で「せん断耐力評価指標 D_V 」と「曲げ耐力評価指標 D_M 」を定義する。

$$D_V = \frac{\min(V_{bu}, V_u)}{Q_{DS}} \quad (13)$$

$$D_M = \frac{2M_u / L}{Q_{DS}} \quad (14)$$

$D_V < 1$ の場合は、せん断破壊が生じるとし、 $D_M < 1$ の場合は、曲げ破壊が生じるとする。図 3 に示すように、時間の経過とともにせん断耐力評価指標および曲げ耐力評価指標は低下して限界値 (=1) に近づく。そこで、評価指標の分布はモンテカルロ法により鉄筋腐食速度を乱数として求め、その分布の一部が限界値以下にある部分の総面積を「せん断破壊確率 P_V 」および「曲げ破壊確率 P_M 」と定義して算出する。

図 3 セン断破壊確率の定義 (曲げ耐力も同様)

3.5 層破壊確率

同層の各柱の破壊確率に基づき、重みづけ平均法で層破壊確率を評価することとした (式 (15))。柱の軸方向耐力は重要性を反映し、同層の各柱の軸方向耐力の総和に対する比率を重み付け係数として定義した。

$$P^j = \frac{\sum_{i=1}^N [(P_{V1}^j + P_{M1}^j) \times Q_i^j] / \sum_{i=1}^N Q_i^j}{\sum_{i=1}^N Q_i^j} \quad (15)$$

P^j : j 階の層破壊確率、 P_{V1}^j : j 階の i 柱のせん断破壊確率、 P_{M1}^j :

j 階の i 柱の曲げ破壊確率、 Q_i^j : j 階の i 柱の軸方向耐力、 N : 階ごとに柱の本数

3.6 建物破壊確率

一般の構造系¹⁶⁾は、破壊確率において概念的に直列系や並列系のシステムで表現することができる。直列系は、どれか 1 つの破壊がシステムの破壊となることから、破壊確率の和として表現される。また、並列系は全ての破壊が同時に生起する時、システムの破壊となることから、破壊確率の積事象で表現される。本研究では、直列系に基づきどれか 1 つの層破壊が建物の破壊につながると仮定して、下式のように建物破壊確率を評価できるものとした。

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P^i) \quad (16)$$

P_f : 建物破壊確率、 M : 建物の層数

4. 使用安全性評価¹⁷⁾及び剥離確率

先述したように、本研究では、仕上げ材までも含めた鉄筋コンクリート造の構造体及び部材における使用安全性は、柱、梁及びスラブにおいては、小中地震 (再現期間 100 年の地震動; 定常ポアソン過程、年間超過発生確率は 1.0%) に於いても、コンクリート片または仕上げ材が剥落しないことによって保証されるものとした。そこで、使用安全性は、コンクリートの一体性またはコンクリートと仕上げ材との一体性によって評価することとした。使用安全性を脅かすコンクリート片または仕上げ材の剥離現象が生じる状況としては、鉄筋コンクリート造においては、鉄筋の腐食膨張によるかぶりコンクリートのひび割れが進展・拡大してコンクリート片及び仕上げ材の剥離に至る場合が想定される。

本研究では、中性化速度、かぶり厚さおよび鉄筋腐食速度の不確実性を考慮した上で、剥離が生じるひび割れ幅¹⁸⁾は 0.5mm-1.0mm (均一分布) と設定し、式 (2) と式 (3) により剥離が生じる鉄筋腐食量を算定し、モンテカルロ法で最外側鉄筋に対する「剥離確率 P_s 」を使用安全性評価として計算することとした。なお、簡便に評価するため、部材の種類によらず鉄筋のかぶり厚さは同一と仮定した。

5. 劣化リスク及び LCC の算定

5.1 設計供用期間の劣化リスク

劣化予測結果に基づいて算定した「建物破壊確率 P_f 」、「剥離確率 P_s 」、再現期間 500 年、100 年の地震動の年超過確率 (v_f と v_s) および破壊により生じる損失コスト (C_f)、剥離により生じる損失コスト (C_s) を用い、式 (17) により設計供用期間の劣化リスク (E) を算定する。ただし、損失発生時の損失額も現在価値に換算し評価した。

$$E = \int_0^T \frac{1}{(1+k)^t} \times (C_f \times P_f \times v_f + C_s \times P_s \times v_s) dt \quad (17)$$

$$k = \frac{(1+i)}{(1+h)} - 1$$

T : 設計供用期間 (年)、 i : 資本の利率、 h : 物価上昇率、 v_f : 再現期間 500 年の地震動の年超過確率、 v_s : 再現期間 100 年の地震動の年超過確率、 C_f : 破壊による損失コスト、 C_s : 剥離による損失コスト

5.2 LCCの算定式

最適な維持保全計画を設定するために、劣化リスクを求めた上で、初期建築費用 (C_I) に補修・補強費用を加え、供用期間を通しての総出費 (LCC、 C_T) を下式により算定するものとした。

$$C_T = C_I + \sum (C_{Rep} \times \frac{1}{(1+k)^{j_{Rep}}}) + \sum (C_{Ret} \times \frac{1}{(1+k)^{j_{Ret}}}) + E \quad (18)$$

C_I : 初期建築費用、 C_{Rep} : 補修コスト、 C_{Ret} : 補強コスト、 t_{Rep} : 補修を実施する年、 t_{Ret} : 補強を実施する年

損失コストの設定は、単純に撤去・再建費用のみを考慮すればよいわけではなく、施設、設備または建築物が使用できなくなったことによる営業損失、人的損失などを考慮する必要があるが、これを見積ることは極めて難しい。現状はこれを定量的に評価することが困難であることから、本論文の解析には含めないこととする。したがって、既往の研究⁸⁾⁹⁾¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾から、初期建築費用の基準金額を定め、破壊による損失コストは初期建設費用の20倍⁸⁾⁹⁾²²⁾²³⁾、剥離による損失コストは初期建設費用の2倍¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾とした。

6. 補修・補強の設定

本研究では、以下のように3つの補修・補強水準を設定し、それぞれの条件に従い建物破壊確率及び剥離確率を更新する。ただし、後述の免疫的アルゴリズムによって維持保全計画の最適化を行うことは、膨大な計算量が必要なため、層破壊確率と剥離確率に補修・補強の効果を次のように直接反映することとした。

6.1 表面補修 (仕上げ材更新、TYPE-I)

補修年では、初期の仕上げ材と同一の仕上げ材を施し、仕上げ材の中性化速度係数は初期値に戻るとした。図5のように補修実施年の剥離確率をゼロにもどすが (C→D)、断面補修を行わないため、鉄筋腐食に繋がる劣化要因はそのままとすることから、潜伏期間がゼロと設定した場合の初期建設時の剥離確率曲線と同様に推移することとした。また、表面補修のみを考慮し、構造物の補強は行わないため、層破壊確率の低減は生じないものとした。

6.2 断面補修+表面補修 (TYPE-II)

図5 補修・補強の設定

補修年では、鉄筋の錆を落とし、コンクリートの中性化部分を除去するとともに、元の仕上げ材と同一の材料を用いて表面補修を行う。図5のように補修実施年の剥離確率はゼロとし (C→D)、この部分を起点に初期建設時と同様に推移することとした。また、断面補修によってコンクリート中の劣化要因を除去することで構造耐力の低下を停滞させるものと仮定し、潜伏期間を設けた。潜伏期間終了後は、元の曲線と同様に推移することとした。

6.3 鉄筋追加+断面補修+表面補修 (TYPE-III)

ここでは、中性化した部材に対して補修を行うほかに、地震に対する安全性向上を目的として補強も実施する。補強年では、鉄筋の錆を落とし、コンクリートの中性化部分を除去するのに加え、元の鉄筋量と同等となるように鉄筋を追加する。また、元の仕上げ材と同一の材料を用いて表面補修もする。図5のように補修・補強実施年の破壊確率と剥離確率を初期状態にし (A→B、C→D)、この部分を起点に初期建設時と同様に推移することとした。

6.4 補修・補強費用の算定

補修・補強水準およびその費用は表1のように設定した。

まず、剥離確率と鉄筋の重量減少率をもって全面的補修・補強に対する割合を算定する。鉄筋を追加する場合、柱の位置によって鉄筋の重量減少率が若干違うため、平均値をもって補強費用を算定することとした。補修・補強には、建物に対する全面的表面補修もふくまれる。なお、剥離確率がゼロの場合は、断面補修を実施しないと、層破壊確率はゼロの時、当層の鉄筋を追加しないと。層毎の補修・補強後の破壊確率に基づき、建物破壊確率を計算し、損失を評価する。

7. 免疫的アルゴリズムの適用

7.1 免疫的アルゴリズムの特徴³⁾⁴⁾²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾

IAの基本構成は、(1) 遺伝的アルゴリズムに基づく解の再構成、(2) 記憶細胞による有効解の記憶、(3) サプレッサーT細胞による記憶解再探索の抑制となっている。この構成により、GAのもつ強力な探索能力に加え、有効解の再利用および再探索の抑制による探索効率の上昇が期待される。GAの計算手順は文献1に基づき設定した。

表 1 補修・補強費用の算定

種類	施工方法	補修・補強費用の算定
TYPE-I	表面補修	表面補修費用
TYPE-II	表面補修 断面補修	表面補修費用+ Σ (層毎の断面補修費用×剥離確率)
TYPE-III	表面補修 断面補修 鉄筋追加	表面補修費用+ Σ (層毎の断面補修費用×剥離確率) + Σ (層毎の補強費用×鉄筋の平均重量減少率)

*層毎の断面補修費用＝層全体の柱・梁の全体の露出表面積×断面補修単価

*層毎の補強費用＝層全体の柱の最外側鉄筋全部を取り替える費用

* Σ ：1階からM階までの積算

7.2 計算手順

(1) 抗原の認識

IA においては、最適化問題の目的関数を抗原、問題の解候補を抗体、解の集合を記憶細胞と呼び、抗原と抗体の親和度を解の評価値と呼ぶ。計算手順を図 6 に示す。

(2) 初期抗体群の生成¹⁾²⁷⁾

本研究における遺伝子型(図 7)は、1回の維持保全活動を4ビットとし、最大10回まで維持保全活動を行うものとして、計40ビットの遺伝子長とした。1回の維持保全活動の遺伝子型の内訳は、今回採用した4水準の維持保全方法を表す2ビット(2²種類)の識別子と、直前の維持保全実施時期からの期間を表す2ビット(2²種類)の識別子からなるものと定義した。

(3) 親和度・類似度の計算

抗原(LCC、 C_T)と抗体 v (維持保全計画)の親和度 ϕ_v (評価値)は、式(19)のように供用期間を通しての総支出(C_T)の逆数とし、総支出の減少につれ、評価値が高くなるよう定義した。抗体 v と抗体 w の類似度 ψ_{vw} (類似性を示す値)は、二つの解に共通する遺伝子の割合を示す。

$$\phi_v = \frac{1}{C_T} \quad (19)$$

(4) 濃度計算

各抗体 v の濃度 θ_v は式(20)により与える。抗体 v と抗体 w の類似度 ψ_{vw} が所定の閾値 $T_{\pi 1}$ より小さい場合、類似性がないと見なし濃度 θ_v に反映させない。

$$\theta_v = \frac{1}{N} \sum_{w=1}^N \pi_{vw} \quad (20)$$

$\psi_{vw} \geq T_{\pi 1}$ の場合 $\pi_{vw} = 1$ 、他の場合は 0 となる。 N は各世代の総抗体数である

本研究では、世代の抗体群の濃度が閾値 T_n を超えない場合、GA を用いて次世代を産生するものとした。

(5) 記憶細胞とサプレッサーT細胞への分化

各抗体 v の濃度 θ_v が閾値 T_n を超えた場合、記憶細胞候補 μ とする。記憶細胞候補 μ は記憶細胞が上限数に達するまでは、記憶細胞 m に分化させ、記憶細胞が上限数に達している場合には、記憶細胞候補 μ の親和度が記憶細胞群の親和度より高い場合に限り記憶細胞候補 μ との類似度が一番高い記憶細胞に入れ替える。

また、記憶細胞候補 μ は、濃度の高い順にサプレッサーT細胞 s に分化させる。サプレッサーT細胞 s との類似度 $\psi_{\mu s}$ が閾値 T_s 以上になる抗体は消滅させ、類似の解候補の生成を押さえる。本研究では、サプレッサーT細胞の総数 S を各世代の記憶細胞候補の数とした。

図 6 免疫的アルゴリズムの計算手順

図 7 遺伝子のコーディング

(6) 抗体産生の促進と抑制

過度の抗体生成を抑制するため、全ての抗体 v について次式により期待値 E_v を計算し、期待値が低い抗体の一部(本研究では個体数の1/2と設定)を自然消滅させ、残った抗体を次世代の抗体の産生に利用する。

$$E_v = \phi_v \prod_{s=1}^S (1 - \Xi_{vs}) \quad (21)$$

$\psi_{vs} \geq T_{\pi 2}$ の場合 $\Xi_{vs} = \psi_{vs}$ 、他の場合は 0 となる

(7) 抗体の産生

消滅させた抗体に代わる新しい抗体を、残った抗体の選択、交叉及び突然変異により再構成する。選択方式は期待値 E_v を用いたルーレット戦略とした。交叉操作により新しく抗体を産生させ、次世代の抗体群を準備する。産生した抗体に対しては突然変異操作も導入した。上記に従い、再構成した抗体と上記(6)で残った抗体は次世代の抗体群となる。

7.3 解の多様性²⁵⁾²⁶⁾²⁸⁾

解の多様性は、平均情報エントロピーによる多様度評価の概念を導入した。抗体群は G 個の遺伝子座を持つ N 個の抗体から構成され、抗体の取り得る記号(対象遺伝子)が L 個存在すると仮定する。このとき、抗体の遺伝子座 j の情報エントロピー $H_j(N)$ は式(22)で与えられる。また、抗体(個体)の平均情報エントロピー $H(N)$ は式(23)で定義される。このとき、 $H(N)$ が高いほど多様性があると評価される。

$$H_j(N) = - \sum_{i=1}^L p_{ij} \log p_{ij} \quad (22)$$

$$H(N) = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^G H_j(N) \quad (23)$$

p_{ij} = 遺伝子座に出現した i 番目の記号/ N (i 番目の記号の出現率)

8. ケーススタディーによる検証

計算対象は、12 階建て RC 造建築物（ラーメン構造）（図 8）とした。劣化予測に必要なパラメータは 1 階、6 階、12 階の側柱を例として表 2 の通りとした。ヒアリング及び積算資料²⁹⁾³⁰⁾³¹⁾による表 3 のような補修・補強費用の内訳を基に層毎の断面補修費用は初期建築費用の 0.05 倍、層毎の補強費用は初期建築費用の 0.1 倍と設定し、LCC 評価の計算に必要なパラメータを表 4 に示す。本研究では、3 種類の仕上げ材（NCoat：仕上げ材なし、MCoat：モルタル、CCoat：樹脂塗膜、TCoat：タイル；N：維持保全なし、R：維持保全ある）を設定し、各評価条件を表 5 に示す諸元にて仮定した。GA と IA に関わるパラメータは表 6 に示すとおりとした。

以上を踏まえ、予定供用期間を 100 年として LCC を最小化する維持保全計画を求めた。その結果、図 9 に示すような仕上げ材を施した建物に対する維持保全計画の準最適解（IA は上位 3 つ）が得られた。各仕上げ材を施した場合に対して、最適維持保全計画を実施することにより図 10 及び図 12 のように有効に LCC、鉄筋の平均腐食量、剥離確率及び建物破壊確率が減少できた。維持保全を行わない場合、タイル仕上げを施するケースで初期建設費用が高いが、他の仕上げ材より有効に中性化を抑制し、LCC（100 年の予定供用期間）は一番低い結果になった。各ケースの LCC は初期建設費用の約 1.6～2.0 倍となったが、最適維持保全計画を行った場合、約 1.15 倍に低減した。

建物破壊確率については、維持保全を行わない場合は、中性化による鉄筋腐食量が増えるにつれて高くなり、仕上げ材の種類に関わらず 100 年の時点で約 80% 以上となった。最適維持保全計画を実施した場合、各ケースの鉄筋の平均腐食量は約 3% 以下（鉄筋の腐食グレード¹⁰⁾ は III、劣化度は軽度）に抑えられ、建物破壊確率も供用期間を通じて約 10% 以下となり、地震を想定した場合においても構造工学的に安全であると判断できると考える。小中地震を被災した場合における剥離確率は、維持保全を行わない場合には各仕上げ材のケースとも腐食し始めてから 20 年後には 100% となった。つまり、もし小中地震が発生したら、剥離による損失は膨大になると考えられる。しかしながら、維持保全を実施すれば、樹脂塗膜を除き供用期間を通じて 10% 以下に抑えられる。

補修・補強前後の LCC における各費用の構成比を図 11 示す。維持保全を実施しない場合、劣化リスク（剥離による損失と破壊による損失）の LCC に対する比率は仕上げ材の種類に関わらず 35% 以上で、特に仕上げ材のない場合には劣化リスクと初期建設費用の比率はほぼ同じである。維持保全を実施することで、いずれのケースにおいても劣化リスクの比率は 3% 以下に抑えられ、補修・補強費用の比率も 10% 以下となった。ただし、初期建設費用比率は約 90% となった。

各世代における最良解の親和度は図 13 のように推移した。GA と IA 共に同じ解に収束したが、IA を用いた場合には類似解に対する抑制機構があるため収束解近傍で解が変動しているものと考えられる。さらに、本システム自体の有効性を検証するために解の多様性に関する検討を行った。各世代の個体（SH）と各世代から得られた準最適解（SAH；GA は上位 10 個、IA は記憶細胞）の多様性は図 14 のように示される。個体の多様性については、GA より IA のほうが多様であり、多様性が高いほど、類似の解への抑制力は高くなり、局部解に陥りにくいものと考えられる。つまり、IA では独自の調節機構が働

き、一つの解に収束することが抑制されている。このように、準最適解の多様性については、GA では世代数の増加につれて多様性が低くなるが、IA では逆に高くなるため、解析の最後まで準最適解の多様性が維持できることを示す。つまり、複数の準最適解を一度に探索できる IA の能力が示されたものと考えられる。

図 8 基準階伏図

表 2 劣化予測に必要なパラメータ

側柱の位置	1 階	6 階	12 階
せい D (cm)	95	95	90
幅 b (cm)	95	95	90
内法スパン L (cm)	400	350	350
かぶり厚さ x (cm)	4.00	4.00	4.00
主筋の直径 d_b (cm)	4.1	4.1	3.2
主筋の降伏強度 σ_{yo} (N/mm ²)	400	400	400
補強筋の降伏強度 σ_{wyo} (N/mm ²)	800	800	300
補強筋比 p_w	0.003	0.003	0.003
要求水準 Q_{DS} (kN) ($\alpha=1.5$)	1046	500.7	98.4
コンクリートの圧縮強度 (N/mm ²)	40.0		

*引張り鉄筋比は約 2.5%；W/C=60%

表 3 補修・補強費用の内訳

補修・補強	補修・補強費用の内訳	円/m ²	×B*
層毎の断面補修	(1) 梁の断面補修費用 (全体の露出表面積)	5000	0.025
	(2) 柱の断面補修費用 (全体の露出表面積)	3300	0.017
	(3) 層毎の断面補修費用 ((1) + (2)) × 1.2*	9960	0.050
層毎の補強	(1) 鉄筋の取り替え (最外側鉄筋全部)	11400	0.057
	(2) 柱の断面補修費用 (全体の露出表面積)	3300	0.017
	(3) 層毎の補強費用 ((1) + (2)) × 1.2*	17640	0.088

*初期建築費用単価 B (円/m²)：200000 円/m²

*1.2 倍の原因は仮設工程費用を考慮することである

9. 結論

本研究では、RC 建築物の中性化に伴う劣化リスクの計算手法を提示し、それに従って、RC 建築物の LCC 評価を行い、IA を用いて LCC を最小化する最適維持保全計画を構築するシステムを提案した。いくつかのケーススタディーを行った結果、本システムを利用することにより、出力解から LCC を最小化する維持保全計画が得られ、再現期間 100 年の地震動に伴う仕上げ材及びコンクリートの剥離確率及び再現期間 500 年の地震動に伴う建物の破壊確率を有効に低減できることが示唆された。

表4 LCC 評価に必要な費用項目

初期建築費用 C_i	1.00
破壊による損失コスト C_f ($\times C_i$)	20.0
剥離による損失コスト C_s ($\times C_i$)	2.0
層毎の断面補修費用 ($\times C_i$)	0.05
層毎の補強費用 ($\times C_i$)	0.1
資本の利率 i (%)	3.0
物価上昇率 h (%)	1.0

*仕上げ材の更新費用は表5

表5 仕上げ材の種類

種類	なし (NCoat)	モルタル (MCoat)	樹脂塗膜 (CCoat)	タイル (TCoat)
厚さ (mm)	-	20	0.10	-
中性化抑制効果の係数 S	-	-	-	0.5
等価かぶり厚さ M_{eq} (mm)	-	16	-	-
仕上げ材耐用年数 (年)	-	-	10	-
コスト ($\times C_i$)	0	0.01	0.02	0.05

中性化速度係数 A (mm/(年)^{0.5}): 7.57

図9 GA及びIAによる維持保全計画 (*IAの場合は、上位3つを示す)

表6 GA と IA に必要パラメータ⁴⁾

種類	GA	IA
固体数	100	
世代数	400	
選択方法	ルーレット戦略+エリート保存	
交叉方法	一点交叉 (交叉確率 75%)	
突然変異確率	0.5%	
記憶細胞数	-	10
$T_{\pi 1}, T_{\pi 2}, T_S$	-	0.80
T_{Π}	-	0.50

図10 予定供用期間のLCC (最適維持保全計画)

図11 LCCの構成比 (最適維持保全計画)

図12 鉄筋の平均腐食量、剥離確率と破壊確率 (最適維持保全計画)

図 13 各世代における最良解の親和度の推移

図 14 各世代及び解の多様性の推移

さらに、本システムの出力解から多様性の高い複数の維持保全計画が得られたことを示し、所有者の意思を考慮し実現可能な優位解の探索に対して有効なシステムであることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 兼松学・野口貴文：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、複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画に関するシンポジウム論文集、pp.51-54、2001
- 2) 邱建國ら：塩害に伴う劣化リスクを包含した LCC を最小化する維持保全計画最適化に関する研究、日本建築学会構造論文集、第 616 号、pp.41-48、2007.6
- 3) 高橋敏樹ら：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、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp.1207-1212、2001
- 4) 本間俊雄・加治広之・登坂宜好：免疫アルゴリズムによる構造システムの最適化と解の多様性、日本建築学会構造系論文集、No.588、pp.103-110、2005.2
- 5) 鳥取誠一ら：中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測、土木学会論文集、No.767、V-64、pp.35-46、2004.8
- 6) 川西泰一郎ら：実建物調査に基づくコンクリートの中性化進行に関する分析、日本建築学会構造論文集、第 608 号、pp.9-14、2006.10
- 7) 加藤孝佳・魚本健人：補修リスクを用いた検査実施の優先順位決定方法の提案、コンクリート工学論文集、第 16 巻第 2 号、pp.101-107、2005.5
- 8) Dimitri V. Val・Mark G. Stewart：Life-Cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments、Structure Safety、Vol.25、pp.343-362、2003
- 9) 高橋稔明ら：塩害環境における RC 構造物の LCC 算定と補修工法選定システムの開発、コンクリート工学論文集、第 16 巻、第 3 号、pp.21-29、2005.9
- 10) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説、2004
- 11) 河野政則ら：仕上塗材の経年劣化を考慮した中性化抑制効果に関する研究、日本建築学会構造論文集、第 584 号、pp.15-21、2004.10
- 12) 河野政則ら：仕上塗材の経年劣化を考慮した中性化抑制効果評価手法の暴露データによる検証、日本建築学会構造論文集、第 609 号、pp.9-14、2006.11
- 13) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規程・同解説（許容応力度設計法）、1999

- 14) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の長期的性能照査支援モデルに関するシンポジウム（委員会報告書）、2004
- 15) 福島正人ら：鉄筋コンクリート構造（第 6 版）、pp.123-125、森北出版株式会社、2004
- 16) 柴田明徳：確率的手法による構造安全性の解析、pp.172-175、森北出版株式会社、2005
- 17) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針（案）・同解説、1997.1
- 18) Jung S. Kong, M.ASCE・Dan M. Frangopol, F.ASCE：Probabilistic Optimization of Aging Structures Considering Maintenance and Failure Costs、Journal of Structural Engineering (ASCE)、Vol.131、No.4、pp.600-616、2005.4
- 19) Dan M. Frangopol, Eugen Brühwiler, Michael H. Faber, Bryan Adey：Life-Cycle Performance of Deterioration Structures (Assessment, Design and Management)、ASCE、2003.8
- 20) Mark G. Stewart, M.ASCE・Dimitri V. Val：Multiple Limit States and Expected Failure Costs for Deteriorating Reinforced Concrete Bridges、Journal of Bridge Engineering (ASCE)、Vol.8、No.6、pp.405-415、2003.11
- 21) Dimitri V. Val：Effect of Different Limit States on Life-Cycle Cost of RC Structures in Corrosive Environment、Journal of Infrastructure Engineering (ASCE)、Vol.11、No.4、pp.231-240、2005.12
- 22) Jun Kanda・Haresh Shah：Engineering role in failure cost evaluation for buildings、Structure Safety、Vol.19、No.1、pp.79-90、1997
- 23) 神田順：損失費用モデルを用いた最適信頼性に基づく設計用地震荷重、日本建築センター助成研究、No.9313、1998.6
- 24) 高橋敏樹ら：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、大林組技術研究所報、No.65、pp.47-52、2002
- 25) 中村秀明ら：遺伝的アルゴリズムおよび免疫アルゴリズムによる橋梁維持管理計画最適化の検証、構造工学論文集、Vol.47A、pp.201-210、2001.3
- 26) 長谷川稔彦・伊庭齊志：免疫系を用いた遺伝的プログラミングによる多峰性探索、人工知能学会論文誌、Vol.21、No.2E、pp.176-183、2006
- 27) 兼松学：建築材料分野における性能指向型設計支援多基準最適化システムの構築、学位論文、2005.3
- 28) 石田好輝：免疫型システムとその応用（免疫系に学んだ知能システム）、コロナ社、1998.7
- 29) 建築資料研究社：積算ポケット手帳（建築材料・施工全般）、2007 前期編
- 30) 財団法人経済調査会：マンション Re（積算資料ポケット版）、2007 前期編
- 31) 財団法人経済調査会：マンション修繕編（積算資料ポケット版）、2006 後期

(2007年9月6日原稿受理、2007年11月13日採用決定)