

論文の内容の要旨

論文題目：劣化リスクを包含した LCC に基づく RC 造建築物の維持保全最適化システムに関する研究

氏名：邱建國

都市には数多くのストックがあり、RC 造建築物はその都市のストックの重要な一部分である。また、都市の再生及び環境問題を解決するための一環として、鉄筋コンクリート造建築物の維持保全・長寿命化を実現するための様々な技術の確保が必要である。RC 造建築物の維持保全・長寿命において重要となるのは、RC 造建築物の経時的な状態変化を想定し、将来の状態変化を現時点において定量的に分析し、予測によって維持管理或は維持保全に反映させるということである。維持管理或は維持保全の際に考慮すべき事象としては、建築物の供用期間中に建築物の機能・性能を妨げる原因となる全ての事象となる。国や地域などにより配慮すべき事象が異なるが、本研究では地震及び材料劣化による被害を想定し、これらの焦点を絞ることとする。

維持管理或は維持保全の問題はコンクリート工学の有史以来の第一義的なテーマであり続けているが、リスクマネジメントという考え方の近年の急速な広がりや世の中における受容を受けて、リスクマネジメントの考え方に基づいて改めて維持管理或は維持保全の問題を捉え直す機運が高まっている。そこで、近年、リスクを考慮する維持保全或は維持管理に関する研究が多くなされているが、その多くは地震や補修リスクに関するものであり、材料劣化を考慮した耐震安全性のリスクの評価はほとんどなされていない。

一般的に、中性化や塩害など RC 造建築物に発生する劣化現象の大部分は、鉄筋の腐食による建築物の耐力低下につながる。したがって、RC 造建築物の耐久設計及び最終的な寿命の評価は、鉄筋の腐食に伴う耐力低下に基づいてなされるのが適切であるといえる。鉄筋が腐食した構造部材は、その腐食要因を調査した後、適切な補修を施すのが一般的であるが、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。性能設計、不動産群のリスク分散化、ライフサイクル維持管理が重視される現在、適切な劣化リスクの評価モデルと維持保全計画の構築システムが必要である。

建築物における維持保全活動を計画する前に、まず耐用年数あるいは限界状態を評価する。近年、鉄筋コンクリート造建築物の耐用年数の評価規準としては、中性化寿命説（あるいは塩分侵入量）、鉄筋の腐食確率に関するひびわれ寿命説及び構造耐力低下寿命説の三つがある。いずれも確率的手法により環境条件やコンクリートの品質などのばらつきを考慮し、既往の実態調査に基づき限界量を要求機能・性能に合うように設定して耐用年数を予測する。鉄筋腐食確率は部材のひび割れと構造耐力低下との関係があるが、要求機能・性能に基づき明確的な評価手法が必要である。

以上の背景を踏まえ、頻繁に地震に見まわれる日本においては、RC 造建築物を対象として構造安全性能及び使用安全性能に基づきその耐久性・寿命を検討し、劣化リスクを含むライフサイクル

ルコスト（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。さらに、実際の建築物の維持保全計画を定める場合、単に経済的最適計画が要求されるだけでなく、所有者の意思及び劣化状況を考慮した実現可能で評価の優れた他の準最適計画も重要になる場合も少なくない。このため、本研究は、中性化、塩害などに伴う劣化リスクを含めた LCC 及び所有者の意思と劣化状況を考慮する最適な維持保全計画の構築を目的とする。この目的を達成するため、以下の研究項目を明らかとする事を目指す。

◆RC 造建築物における劣化モデルの構築及び劣化に伴う損失の評価（劣化リスク）

◆限界状態に基づく耐用年数の評価

◆既存 RC 造建築物における劣化予測の修正

◆維持保全行為の影響を評価するためのメンテナンス効果の実装

◆維持保全行為における費用モデルの構築

◆LCC 最小化を目的とする維持保全計画準最適解の導出（経済性）

◆所有者意思及び劣化状況に基づく最適補修水準の推論（実現性）

本論文は全七章で構成され、各章の概要及び主な内容を下記のようにまとめる。

▲第一章 序論

本章では、この研究の背景及び目的、本論文の構成を述べる。

▲第二章 既往研究及び文献調査

本章では、既往の文献調査により、土木・建築分野におけるリスクマネジメント、耐用年数及び限界状態、維持保全計画、最適化システムに関する研究を本研究との関連を中心にまとめる。

▲第三章 劣化リスクの評価手法に関する研究

本章では、塩害、中性化及び複合劣化（中性化及び内蔵塩分、凍害及び塩分侵入、凍害及び中性化）の劣化リスク評価の構築手法を提案することを目的とする。不確実性を考慮した劣化モデル（塩害、中性化及び複合劣化）を通して腐食開始時期を評価し、鉄筋の腐食程度を変数とする各材料要素の構成則を既往の実験に基づいてまとめ、「トラス・アーチ理論」および「平面保持を仮定した塑性曲げ理論」により、鉄筋が腐食した部材の構造性能（せん断耐力と曲げ耐力）を簡便に算定する。鉄筋が腐食した部材のせん断耐力と曲げ耐力を把握する上で、地震危険度分析での再現期間 500 年（二次設計時の大地震、震度階 6 強～7）となる地震動を倒壊によって人命の損失を生じないような要求基準とし、構造安全性能指標を構築する。また、腐食速度の不確実性を想定し、確率論的手法を用いて部材及び建物の「破壊確率」を算定し、想定する供用期間のリスクあるいは損失を評価する。

RC 造建築物の劣化に伴うリスク（図 1）には、再現期間 500 年の地震動に対する損失コスト（構造安全性能評価）のほかに、再現期間 100 年の地震動に対するコンクリート剥落による損失コスト（使用安全性評価）も含まれる。本研究では、かぶり厚さや鉄筋腐食速度などの不確実性を考慮した上で、文献及び調査により剥離が生じる鉄筋腐食量を設定し、最外側鉄筋に対する「剥離確率」を使用安全性評価として算定し、想定する供用期間の損失コストを評価する。

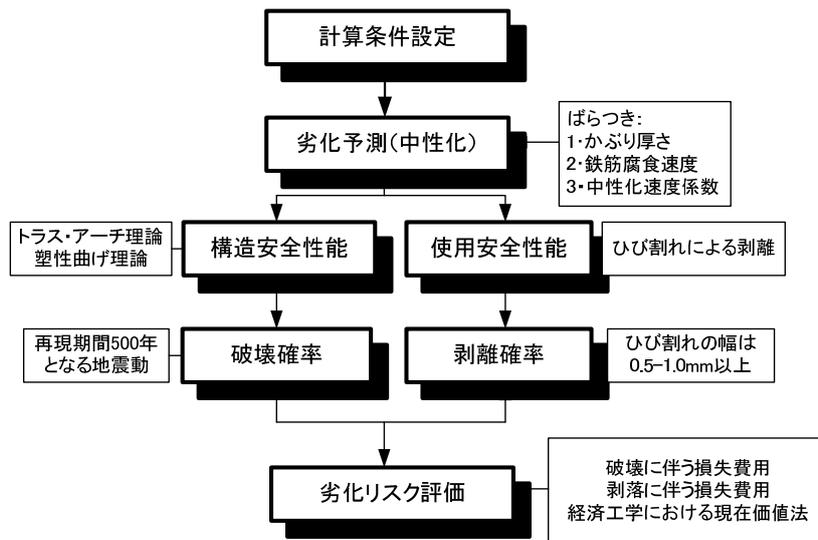


図1 劣化リスクの計算フロー（中性化事例）

第四章 RC 建築物・部材の耐用年数及び限界状態に関する研究

本章では、信頼性理論により第三章に示す構造安全性能及び使用安全性能の限界状態を考慮して RC 造建築物・部材の耐用年数の予測手法を提案することとした。なお、既存建築物の維持保全および耐用年数予測は、新築の建築物と違い、劣化に関わるデータが予測値だけではなくて、現時点で得られた点検資料や調査資料などもある。既存建築物を対象として詳細な調査により得られた中性化深さ、侵入塩分量あるいは鉄筋腐食量がそれまでの予測値と異なることになった場合、それまでの予測を更新する必要がある。このため、本章ではベイズ法（Bayesian Method）により詳細調査の結果を用いて予測値を更新し、さらに更新した資料に基づいて先の将来予測（中性化深さ、塩分侵入量、鉄筋腐食量など）を行い、耐用年数および限界状態を再評価する方法を提案することとした。

第五章 補修の費用及び効用に関する研究

本章では、以下のように5つの補修水準を設定し、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には膨大な計算量が必要なため、確率論手法に基づき補修後の効果評価モデルを構築することとした。

- ▲TYPE-I ---外観補修（補修部分の再劣化が含まれる）
- ▲TYPE-II ---外観補修+腐食部分補修（補修部分の再劣化が含まれる）
- ▲TYPE-III ---外観補修+腐食部分補修+全面的内存劣化要因除去
- ▲TYPE-IV ---外観補修+腐食部分補修+鉄筋追加（補修部分の再劣化が含まれる）
- ▲TYPE-V ---外観補修+腐食部分補修+全面的内存劣化要因除去+鉄筋追加

維持管理や維持保全を計画することには、補修後の効果評価はもちろん、コストの見積りも重要だと考えられるが、現時点では、劣化に伴う補修必要面積の精度よく予測できる方法が欠如している。このため、本章では、劣化後の剥離確率及び鉄筋の重量減少率（部材の最外側）をもとに補修水準及び劣化状況により補修範囲を評価し、コストを計算する方法を提案する。

第六章 維持保全計画最適化システムの構築に関する研究

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なく、所有者の意思及び劣化状況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 (Immune Algorithm ; 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 IA により塩分侵入や中性化などに伴う劣化リスクを含めた 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う。さらに、IA からの準最適解集合 (LCC は一定の範囲内) に対して、簡略化ファジィ理論により所有者意思及び劣化状況に基づく実現性の最も高い維持保全計画、即ち本研究での最適維持保全計画を推論する方法を提案する (図 2)。つまり、本研究での最適維持保全計画というのは、LCC を減少することに対して有効だけではなく、実現性に対して高い評価を持つものである。

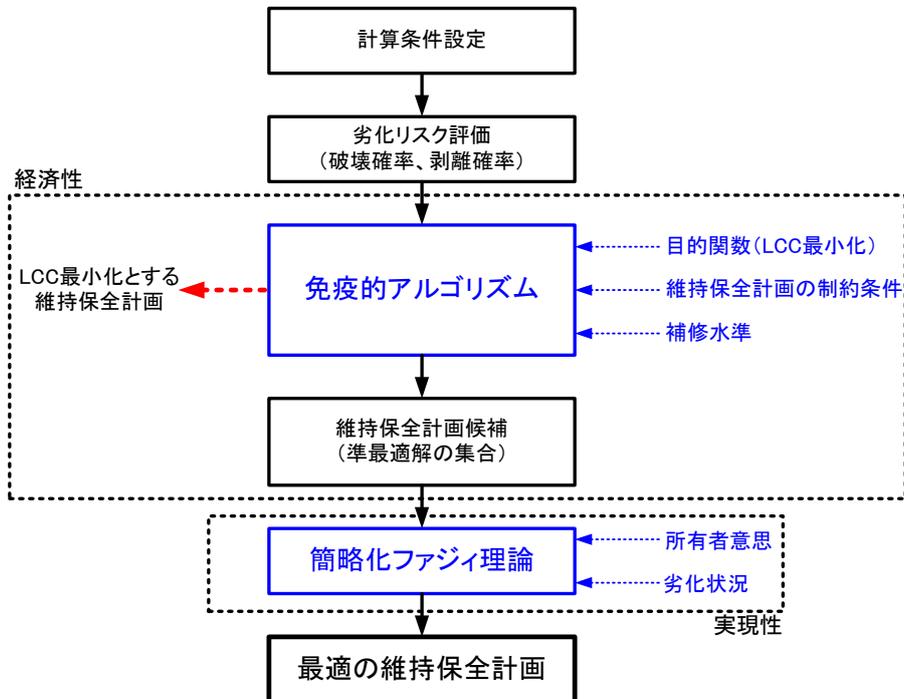


図 2 維持保全計画最適化システム

第七章 結論

本論文における総括の結論として論文の全般的なまとめについて述べる。一連の試算例を基礎とし、IA 或は GA による LCC を最小化する維持保全計画により、塩分侵入、中性化及び複合劣化に伴う建物の破壊確率、剥離確率、鉄筋腐食量及び LCC が減少される。つまり、本研究に提案した維持保全計画最適化システムにより LCC を減少することに対する有効な補修計画を探索することができると考えられる。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、所有者意思及び劣化状況を考慮し実現可能な優位解の探索に対しても有効なシステムであることが明らかになった。