

## 学 位 論 文 題 名

塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の  
劣化進行予測手法の開発

## 学位論文内容の要旨

近年、社会資本ストックの量的増大と経年劣化の進展に伴う維持管理費用の増大が見込まれるなか、予算の制約下での社会資本ストックの効率的な維持管理が求められている。コンクリート構造物は、調査・点検で把握された劣化状態に応じて、主として事後保全的に対策を講じることにより、これまでも適切にその機能が維持されてきた。しかし今後は、あらかじめ構造物の劣化進行を予測し、ライフサイクルコスト最小化の観点から対策工を選定する等して、計画的な予防保全を行うことが必要である。このような状況のもと、新設構造物の設計や既設構造物の補修対策においても、種々の劣化機構に対する構造物の耐久性の照査が行われている。なかでも、鉄筋コンクリート構造物の塩害による劣化は、主要な検討項目の一つとなっている。また、塩害、中性化やアルカリ骨材反応 (ASR, Alkali Silica Reaction) などの劣化機構が複合して作用することは、構造物の劣化の進展を促進する要因ともなる。

以上のような背景を踏まえて、本研究は、様々な環境作用に曝され、塩害を中心とした各種の劣化機構が複合して作用する構造物に適用可能な劣化予測手法の構築を目的としたものである。本研究の特徴は、不確定要素の多い構造物に適用する劣化予測手法を構築するにあたって、構造物の調査データに基づいて、ニューラルネットワークを利用して鋼材の腐食要因と腐食状態との関係を定式化し、腐食状態を状態確率として評価するところにある。また、やはり構造物の調査データに基づいた検討により、塩害を中心とした中性化および ASR が複合して作用する劣化機構にも適用可能な劣化予測の枠組みを構築したことも本研究の特徴の一つである。

本論文は、7 章で構成されている。

第 1 章では、まず、現状の設計における鋼材の腐食発生を限界状態とした耐久性照査方法を整理した上で、塩害による劣化が顕在化した多くの構造物の現状を考慮し、腐食発生後の劣化の進行を予測する手法の必要性を指摘した。電気化学理論に基づくコンクリート中における鋼材腐食の要因は、基本的には酸素濃度、塩化物イオン濃度、pH およびコンクリートの含水率に集約される。しかし、コンクリート中においては、これらの腐食要因の時間的、空間的な分布は不均一となり、マクロな電位分布形成の要因となることによって、腐食速度にも影響を及ぼしていると考えられる。また、構造物レベルの複雑性を考慮した場合、局所的な要因分布を把握すること自体に困難が生じると考えられる。以上の考察を踏まえ、構造物の維持管理への利便性を考慮して劣化予測手法の概念を検討し、ニューラルネットワーク手法を適用することの位置づけを明らかにした。

第 2 章では、構造物を対象に実施される点検および調査の現状を把握し、本研究で劣化予測手法の構築のために収集したデータの種類、範囲および調査方法を整理した。次に、同一位置と見なせる範

囲で、鋼材のかぶり、中性化深さおよび鋼材位置の塩化物イオン濃度といった鋼材の腐食要因と鋼材の腐食状態に関する情報が調査されたものを抽出した。このとき、調査の現状を踏まえて、劣化予測の対象とする劣化指標としては、目視情報に基づく鋼材の腐食度を用いることとした。

第3章では、構造物の点検結果を多数収集することによりニューラルネットワーク手法を適用して鋼材の腐食度を評価する方法について論じ、調査結果や既往の研究との比較により、構築したニューラルネットワークの検証を行った。最終的に予測手法への入力項目は、鋼材のかぶり、鋼材位置の塩化物イオン濃度、中性化深さと平均気温、平均湿度、降水量といった気象条件が選定された。本手法は、これらの入力項目により平衡論的に鋼材の腐食状態を評価するものである。将来予測においては、入力項目の将来値を逐次入力することにより将来の腐食状態を逐次評価するものである。次に、予測手法を統計モデルとして扱い、予測値を4段階の劣化状態確率で表現した。統計モデルとして扱うことの意義は予測結果が予測誤差を反映した形で得られる点にあり、構造物における劣化状態のばらつきをも反映した予測結果が得られることになる。さらに、ベイズ推定の手法を適用することにより、新たな点検結果が追加された場合に、予測結果と点検結果との比較により客観的に入力情報を更新して、予測精度を改善することが可能になった。

第4章および第5章では、劣化予測手法の適用範囲の拡大を目的として、複合劣化を受ける構造物の劣化進行予測手法の枠組みを構築した。複合劣化の機構としては、中性化およびASRと塩害とが複合して作用する場合を対象とした。第4章および第5章の検討結果を、第3章で構築した予測手法における入力項目の一つである鉄筋位置の塩化物イオン濃度の経時変化を求める過程に適用することによって、塩害と中性化およびASRの複合劣化を受ける構造物の劣化状態確率の予測が可能になった。

まず、第4章では、中性化による塩化物イオンの濃縮の影響を劣化予測に反映することを目的として、構造物の調査データに基づく検討により中性化および未中性化コンクリート中における塩化物イオンの固定化性状の変化を定式化した。既往の研究では、コンクリートの中性化により塩化物イオンの固定化性状が変化し、塩化物イオンの移動が促進される結果、中性化部と未中性化部との境界付近で塩化物イオンが濃縮される現象が実験的に明らかにされていた。本研究では、これを定式化したことにより、劣化状態確率の予測に反映することができた。

次に、第5章では、構造物における調査データに基づく検討により、ASRによるひび割れの進展の予測手法を提案した。本手法は、材料および配合、配筋が同一で、単に雨掛りなどの環境条件の違いによってASRによるひび割れ発生状況が異なるとみなせる部材を一つの単位とし、部材単位の調査を前提として、調査時点における部材単位のASRの進行度とひび割れ発生状況との関係を定式化することに特色がある。さらに、ASRによるひび割れの影響を塩化物イオンの拡散係数のマクロな変化として考慮することで、ASRによる劣化を劣化状態確率の予測に反映する枠組みを構築することができた。

第6章では、構造物の維持管理計画策定への予測手法の適用例を示し、構造物の維持管理に要するコストは劣化機構の複合を含むその劣化過程に強く依存すること、劣化過程を精度良く評価・予測して適切な対策時期や対策方法を選定することが構造物の効率的な維持管理のために重要であることを明らかにした。

第7章は本論文の総括である。

以上のように、従来、確定論的に扱われてきた劣化予測に対して、本論文で提案した劣化予測手法を用いることにより、不確定要素の多い実構造物を対象として、劣化機構の複合をも反映した確率論的な劣化予測が可能になった。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 上 田 多 門  
副 査 教 授 名 和 豊 春  
副 査 教 授 杉 山 隆 文  
副 査 准教授 佐 藤 靖 彦

## 学 位 論 文 題 名

### 塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の 劣化進行予測手法の開発

膨大な社会基盤施設の蓄積とともに、それを適切に維持管理し、あるいは、延命化することにより、資源とエネルギー消費を抑え、併せて、ライフサイクルコスト (LCC) の縮減を図ることが、社会的要請となっている。一方において、維持管理に必要な構造物の劣化進行は、構造物の竣工時における初期の状態、構造物が置かれている環境条件によって、多様であるので、その予測を精度よく行うには、より合理的な手法が必要であることも知られている。

本論文は、社会基盤施設の中で多用されているコンクリート構造物を対象とし、劣化事例が最も多い塩害を扱っている。塩害に対する劣化予測手法は具現化されているといえるが、現実の構造物においては、机上での予測と異なることが多い。これを改善するために、対象とする構造物の点検データに加え、これまで蓄積された既設構造物の劣化データに基づいた、より精度の高い予測手法を提案している。さらに、中性化、アルカリ骨材反応 (ASR) との複合劣化の影響下での塩害による劣化進行予測に関しても、同様の手法を提案している。論文の最後には、提案した手法に基づき、種々の補修計画を想定した LCC を試算するなどの有用な知見も示している。

1 章では、構造物の耐久性評価と維持管理の現状を概観した上で、維持管理の具体的な手法としては、劣化が顕在化している状況も含めた、劣化予測手法が必要であることを明らかにしている。そして、本研究で提案する既設構造物における調査可能なデータを最大限利用する経験的なアプローチの必要性を示している。

2 章においては、調査データの説明として、利用可能なデータ数が多い鉄筋の腐食度を劣化の指標として選んだこと、ならびに、使用した収集データの詳細を説明している。データに基づく調査結果として、鉄筋位置での塩化物イオン濃度よりは、かぶりの大きさと腐食の有無の差が出ること、中性化深さが大きくなるとかぶりが大きくても鉄筋腐食が生じやすいこと、を明らかにしている。

3 章では、前章で示した調査データである種々の情報と劣化指標 (鉄筋の腐食度) との関係ニューラルネットワークの学習機能を用いて学習後のネットワークとして確定するとともに、ニューラルネットワーク自体を確率モデルとして扱うことによって、予測を確率論的に行える方法を示し、最後に、点検結果に基づく客観的な予測の修正法としてベイズ理論を適用したものを提示し

ている。提示したネットワークによる推定結果の評価として、中性化深さがかぶりに達していなくても腐食が全体的に発生する状態になりうることを、鉄筋位置の塩化物イオン濃度よりは、かぶりや中性化深さにより腐食の発生条件が決まること、構造物周囲の湿潤状態とコンクリートの含水状態とでは腐食に与える影響が異なるといったことを示し、信頼性のあるモデルであるとしている。

4 章では、塩害による劣化予測の精度を向上させるために、中性化と塩害との複合劣化を乾湿環境をも考慮した劣化予測手法として、コンクリート中の中性化と未中性化領域それぞれにおける塩化物イオンの存在状態の定式化手法を提示している。未中性化コンクリートにおいては、塩化物イオンの吸着等温式がほとんどの場合で Freundlich 型となる。中性化したコンクリート中においては、Freundlich 型で推定される吸着より低下するので、中性化部と未中性化部とで異なる吸着平衡状態となり、中性化部では自由塩化物イオンの割合が大きくなる。これによって、中性化が生じると内部に塩化物イオン濃度のピークが生じることを説明している。

5 章では、ASR の影響下における塩害による劣化進行予測の手法を新たに提示している。ASR による損傷度（膨張率）とひび割れ密度、ひび割れ間隔、ひび割れ幅との関係を定式化し、それらの経時的变化を推定する手法を示している。また、このひび割れに関する情報に基づき、塩化物イオンの拡散を推定し、塩害による劣化進行予測を行っている。

6 章においては、3 章から 5 章までに提示した手法を用いて、塩害が生じる典型的な構造物である栈橋を例に、種々の条件が変わることにより、また、維持補修計画を変えることにより、LCC がどのように変化するかを試算している。また、塩害単独、塩害と中性化の複合、塩害と ASR の複合、塩害、中性化と ASR の複合の場合で、構造物の変状が経時的にどのように起こるかの予測結果の比較を行い、LCC の検討結果を示している。その中で、許容される変状の程度が LCC に大きく影響を与えることを明らかにしている。

最後の 7 章は、1 章から 6 章までのまとめである。

これを要するに、著者は、塩害と複合劣化による劣化進行予測に関する新たな合理的手法を提示しているもので、コンクリート工学および維持管理工学の発展に対して貢献するところ大なるものがある。よって、著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認められる。