

京都大学	博士 (工学)	氏名	齊藤亮介
論文題目	持続可能性を考慮したコンクリート中の鉄筋防食手法に関する研究		
(論文内容の要旨)			
本論文は、コンクリートの中性化および塩化物イオン含有条件において、内部鉄筋を防食する手法の開発を目的としたものである。既存の防食技術を整理し、目的達成の可能性が高いと判断された防せい剤について新たな利用方法を提案し、各種腐食環境における防食性能を示すとともに、実大規模の施工試験を行い実現可能性についても検証している。 第 1 章では、地球環境の変化から将来的に必要となりうる鉄筋防食手法の概念について述べ、本論文の目的を述べている。 第 2 章では、鉄筋腐食反応およびその進展機構を整理し、腐食進行とコンクリート内部の鉄筋近傍の環境との関連性について述べている。さらに、鉄筋周辺環境を規定する主要因として、ひび割れおよび塩化ナトリウム (NaCl) に代表される潮解性塩の存在を抽出している。 第 3 章では、モルタル試験体を用いて、内部乾湿挙動に与えるひび割れおよび NaCl 濃度の影響を系統的に検討している。モルタルの質量変化、内部の温湿度、モルタルのインピーダンス、内部電極の腐食状況を総合的に評価し、NaCl によるモルタル内部の水分移動作用について詳細に検討している。結果をもとに、本論文で達成しようとする、コンクリートの中性化および塩化物イオン含有条件における鉄筋防食に際し、鉄筋近傍における水分供給の制御が重要であると整理している。 第 4 章では既存の防食手法の作用機構、効果および課題を整理し、本研究の目的達成に有効な手法としてコンクリート用防せい剤を選定している。その中でも塗布型防せい剤に着目し、第 5 章でその有効性と適用限界を検討している。その結果、適切な施工条件下では表面から浸透し一定の防食効果を発揮し得るものの、実構造物において所要の浸透深さを確保することが難しいこと、現時点では浸透状態を非破壊かつ簡便に把握・管理する手法が確立されていないことから、かぶりコンクリートを介して鉄筋表面に確実な処理を施すことは困難であると判断している。 第 6 章では混和型防せい剤に着目し、各種防せい剤の防食性能比較を行い、特定のシラン系混和型防せい剤が塩化物イオン共存環境下でも良好な防食性能を有することを明らかにしている。一方で、当該防せい剤の性能を十分に発揮させるにはコンクリート全体に所定量を混和する必要がある、混和することにより生じるコンクリート諸性状への影響について検討し、改善すべき課題について指摘している。			

第7章では、上記課題を解決するため、シラン系混和型防せい剤を鉄筋周囲のみに作用させる局所適用手法を提案している。本手法は、鉄筋に防せい剤を主剤とする噴霧剤をあらかじめ噴霧し、その後コンクリートを打ち込むことで鉄筋近傍の限られた領域に吸水防止層を形成し、水分移動を抑制することを意図したものである。本手法について、外的塩害、内的塩害、中性化と両塩害の複合劣化、鉄筋に到達するひび割れを有する条件など多様な腐食環境下で防食性能を検証している。また、局所適用領域における鉄筋-コンクリート間の付着特性についても評価している。

第8章では、提案手法の施工性について検討している。材料の配合検討を行い、スプレー噴霧による施工を実現するとともに、実大部材を用いた施工試験を行い、実施工と同規模の条件下においても提案手法を施工可能であることを示している。さらに、作製した実大部材の屋外暴露後の評価において、提案手法の効果発現を検証している。

第9章では、本研究の結論として、各章で得られた知見をまとめるとともに、提案した局所適用法をより汎用的に活用するシナリオを示している。さらに、技術の実用化に向けて今後取り組むべき課題を述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、コンクリートの中性化および塩化物イオン含有条件において、内部鉄筋を防食する手法の開発を目的としたものである。既存の防食技術を整理し、目的達成の可能性が高いと判断されたシラン系混和型防せい剤について新たな利用方法を提案し、各種腐食環境における防食性能を評価・検証するとともに、実大規模の施工試験を行い実現可能性について検証したものである。

得られた主な成果は次のとおりである。

1. モルタル試験体を用いて、内部乾湿挙動に与えるひび割れおよび NaCl 濃度の影響を系統的に検討した結果、ひび割れが存在しない場合には、外部環境で乾湿繰返しが生じてモルタル内部の水分移動は相対的に緩慢であり、かぶり 30 mm 以深では乾湿繰返しが生じにくいことを示している。このため、健全なかぶりコンクリートが確保されている条件では、鉄筋周辺は酸素供給が生じにくく、腐食リスクは限定的であることを明らかにした。さらに、質量変化率とインピーダンス計測結果から、コンクリート中に NaCl が存在する場合にコンクリート内部で水分移動が促進されることを明らかにし、その過程をモデル化している。加えて、NaCl によって鉄筋近傍を含む内部領域において乾湿変動が生じやすくなり、鉄筋腐食に対して不利な水分環境が形成され得ることを示した。これらの結果から、本研究の目的達成にあたっては、鉄筋近傍における水分供給の制御が重要であるとしている。
2. 4 種の混和型防せい剤の防食性能を比較し、特定のシラン系混和型防せい剤が塩化物イオン共存環境下でも良好な防食性能を有することを明らかにしている。一方で、当該防せい剤の性能を十分に発揮させるにはコンクリート全体に所定量を混和する必要がある、その結果としてスランプおよび空気量の低下や圧縮強度の低下が生じる材料特性上の課題を確認した。これより、製造するコンクリート全量ではなく、鉄筋周囲に限定した「局所適用」という新たな適用コンセプトの必要性を導いている。

3. 上記課題を解決する局所適用手法を提案し、提案手法について外的塩害、内的塩害、中性化と両塩害の複合劣化、鉄筋に到達するひび割れを有する条件など、多様な腐食環境下で性能評価を行っている。その結果、提案手法は、外的塩害条件および外的・内的塩害と中性化の複合劣化条件において良好な防食効果を示す一方で、内的塩害条件では防食効果が相対的に低下することを明らかにしている。また、局所適用領域における鉄筋-コンクリート間の付着特性を評価した結果、鉄筋表面に残存する防せい剤余剰分が十分に除去されない場合には、最大付着応力度および初期すべり時の付着性能が低下すること、打込み時のコンクリートの流動に伴う洗い作用により、その影響は一定程度低減し得る知見を得ている。
4. 提案手法をより汎用的に活用するためのシナリオとして、中性化到達後の腐食速度を抑制することで耐久性を確保し、従来よりもかぶり厚さの増大や水結合材比の低減への依存度を下げる「中性化許容シナリオ」を提示している。さらに、外的塩害条件で高い防食効果を示すことを踏まえ、塩化物イオン浸透に対する設計要件を緩和する「中性化許容シナリオ」についても提案している。

以上、本論文は、コンクリートの中性化および塩化物イオン含有条件において、内部鉄筋を防食する手法を提案し、その防食効果や施工性について検証したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和8年2月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。