

京都大学	博士（社会基盤工学）	氏名	左藤 眞市
論文題目	コンクリート環境下の鉄筋腐食の特徴に基づく保護性さびの形成とその性質を利用した維持管理に関する研究		
（論文内容の要旨） 本論文は、社会基盤構造物としての鉄筋コンクリートの鉄筋腐食の特徴を詳細に調べ、さらに、コンクリート内の環境を適切に制御することで鉄筋に保護性さびを形成する検討を行ったものであり、鉄筋腐食が問題となる環境を特定、整理し、保護性さびを積極的に活用する鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食に対する維持管理のシナリオを提案するものである。本論文は全8章で構成されている。 第1章では、鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食とその抑制対策に関する現状と課題を述べ、本論文の目的について示している。 第2章では、本論文で扱う鉄の腐食反応を物理化学的な観点から整理したのち、コンクリート内の腐食環境との違いを明確にするために大気腐食の特徴と大気環境下で使用される耐候性鋼に形成される保護性さびの既往研究について整理している。そして、コンクリート内の鉄筋腐食に関する既往研究を整理し、今後の課題について示している。 第3章では、アルカリ環境での鉄の腐食の特徴を調べている。その中で、アルカリ環境にさらされた鉄表面の不動態皮膜が Fe_3O_4 からなることを示している。また、pH 低下と塩化物イオンの存在が、鉄の不動態皮膜を破壊する要因となり腐食が開始することを示している。一方、腐食の進行過程においては、これらの要因（pH 低下や塩化物イオンの存在）よりも、鉄表面に存在する水の影響が溶存酸素量とも関係して非常に重要な因子となることを示している。このことは、コンクリート実構造物に発生した鉄筋腐食の調査からも示され、我が国においては、乾湿繰り返しの環境条件がコンクリート構造物の腐食の進行の主要因となっている可能性が高いことを示している。 第4章では、腐食の進行過程において欠かせない水と酸素がコンクリート内部にどのように存在するかを明確にするために、コンクリート内の湿度を直接測定するなどによって、その水分挙動や鉄筋の水濡れについて検討している。その中で、コンクリート内部の湿度低下速度が非常に遅く、雨掛かり環境のコンクリートについては、コンクリート内部が湿潤状態を維持しやすいことを示している。また、コンクリートに潮解性のある塩分が含まれると、コンクリート外部の大気への水分蒸発という観点からは乾燥速度が遅くなるが、コンクリート内部の水の移動という観点からは浸透圧の作用により水の移動速度が速くなるという特徴を見出している。また、コンクリートの乾燥速度に与える因子として、粗骨材を含むことなどによるコンクリート内の空隙の大きさやその分布が関係することも示している。 第5章では、日本国内最古の鉄筋コンクリート構造の建築物群がある長崎市の軍艦島（正式名称：端島）の調査で発見した鉄筋の表面に形成された保護性さびの特性とその微細構造について調べ、その保護性さびの形成メカニズムを検討している。その中で、保護性さびの優れた腐食抑制性能が、内			

京都大学	博士（社会基盤工学）	氏名	左藤 眞市
層（Fe_3O_4）の緻密なさび構造に由来することを示している。 第6章では、第5章で見出したラマン分光分析に見られる保護性さびの Fe_3O_4 の特徴的な現象（A_{1g} モードのラマンシフトピークが高波数側に大きくシフトする現象）について量子力学的原理から調べ、その保護性さびにおける物理化学的意味を検討している。この検討の中で、共鳴ラマン散乱における未解明な現象を整理し、一つの理論的な仮説を立てることで、これらの未解明な現象をすべて説明することができ、これらの現象が、共鳴ラマン散乱で特有に起きる振電相互作用によるものであることを示している。さらに、ラマン分光に関する既往の研究を整理する中で、Fe_3O_4 に限らずほかの分子でも同様の現象が起きている実験例を見出し、本研究で立てた仮説の妥当性を確認している。 第7章では、第5章で示した保護性さびの形成メカニズムの検証を行うことを目的に種々の調査ならびに実験を行っている。まず、保護性さびが形成しやすい環境を詳しく調べるために軍艦島での腐食環境調査を行い、乾湿繰り返し環境下で剥離性さびが形成する一方で、湿潤状態を維持した環境においては、そのような剥離性さびが生じないことを示している。これら両者の環境で生成したさびの内部をラマン分光分析で調べた結果、湿潤状態を維持したさびでは、保護性さびの Fe_3O_4 に見られる特徴的な現象（A_{1g} モードのラマンシフトピークが高波数側に大きくシフトする現象）を確認している。次に、黒皮付きの鉄筋を腐食させないでアルカリ水溶液に浸漬することで、黒皮の主成分である Fe_3O_4 が結晶化することをラマン分光法で確認している。最後に、腐食した鉄筋をコンクリート内に埋設し、一定期間湿潤状態を維持することで、Fe_3O_4 の A_{1g} モードの高波数シフト現象を確認している。これらの調査ならびに実験のすべてから、第5章で示した保護性さびの形成メカニズムの妥当性を確認している。 第8章では、本研究の結論として、鉄筋コンクリート構造物を維持管理するうえで、鉄筋腐食が問題となる環境の特定に関する指針を述べるとともに、コンクリート構造物の鉄筋腐食を抑制する方法として、安価で確実な防錆原理に基づいた環境制御の観点から、保護性さびを形成させる方法を提案している。そして、本研究の成果を鉄筋腐食に対する維持管理フローの中に適用している。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、社会基盤構造物としての鉄筋コンクリートの鉄筋腐食の特徴を詳細に調べ、さらに、コンクリート内の環境を適切に制御することで鉄筋に保護性さびを形成する検討を行ったものであり、鉄筋腐食が問題となる環境を特定、整理し、保護性さびを積極的に活用する鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食に対する維持管理のシナリオを提案するものである。得られたおもな成果は次のとおりである。

1. コンクリート内のアルカリ環境での鉄の腐食の特徴を詳細に調べ、pH 低下と塩化物イオンの存在が鉄の不動態皮膜を破壊し腐食が開始することを示す一方で、腐食の進行過程においてはこれらの要因 (pH 低下や塩化物イオンの存在) よりも、鉄表面に存在する水の影響が溶存酸素量とも関係して非常に重要な因子であることを示し、コンクリート内で起きる乾湿繰り返しの環境条件がコンクリート構造物の腐食の進行の主要因となっている可能性が高いことを示した。
2. 腐食の進行過程において欠かせない水と酸素のコンクリート内での挙動を明確にするため、コンクリート内の湿度を直接測定するなどを行い、コンクリート内部の湿度低下速度が非常に遅く、雨掛かり環境のコンクリートについてはコンクリート内部が湿潤状態を維持しやすいことを示した。また、コンクリートに潮解性のある塩分が含まれると、コンクリート外部の大気への水分蒸発という観点からは乾燥速度が遅くなるが、コンクリート内部の水の移動という観点からは浸透圧の作用により水の移動速度が速くなるという特徴を見出した。
3. 日本国内最古の鉄筋コンクリート構造物の建築物群がある長崎市の軍艦島 (正式名称: 端島) の調査で発見した鉄筋の表面に形成された保護性さびの特性とその微細構造を調べ、保護性さびの優れた腐食抑制性能が、内層 (Fe_3O_4) の緻密なさび構造に由来することを示した。また、この保護性さびの形成メカニズムを示し、その検証を種々の調査ならびに実験を行って、メカニズムの妥当性を確認した。
4. 保護性さび内層の Fe_3O_4 について、ラマン分光分析から特徴的な現象 (A_{1g} モードのラマンシフトピークが高波数側に大きくシフトする現象) が見られることを見出し、その保護性さびにおける物理化学的意味を量子力学的原理から検討した。この検討の中で、共鳴ラマン散乱における未解明な現象について、一つの理論的な仮説を立てることで、これらの現象をすべて解明した。さらに、ラマン分光に関する既往の研究を整理する中で、 Fe_3O_4 に限らずほかの分子でも同様の現象が起きている実験例を見出し、本研究で立てた仮説の妥当性を確認した。
5. 鉄筋コンクリート構造物の腐食環境の特徴を整理したうえで、鉄筋腐食が問題となる環境の特定に関する指針を述べるとともに、コンクリート構造物の鉄筋腐食を抑制する方法として、安価で確実な防錆原理に基づいた環境制御の観点から、保護性さびを形成させる方法を提案した。

氏 名	左 藤 眞 市
-----	---------

また、本研究の成果を鉄筋腐食に対する維持管理フローの中に適用した。

以上、本論文は、鉄筋コンクリートの鉄筋腐食の特徴を詳細に調べ、コンクリート内の環境を適切に制御することで鉄筋に保護性さびを形成する検討を行ったものであり、鉄筋腐食が問題となる環境を特定、整理し、保護性さびを積極的に活用する鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食に対する維持管理のシナリオを提案するものであり、学術上のみならず、実務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4年2月22日に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。