

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                               |    |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----|-------|
| 京都大学                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 博士（工学）                                        | 氏名 | 宮口 克一 |
| 論文題目                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 塩素固定化材を用いた断面修復材と犠牲陽極材を併用した断面修復工法の鉄筋防食性能に関する研究 |    |       |
| <p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、塩害を受けたコンクリート構造物の対策として一般的な対策のひとつである、断面修復工法を検討の対象とし、その耐久性をより高める方法について検討を行い、効果的かつ経済的な断面修復工法の仕様を提案することを本研究の目的として取り組んだ、一連の研究成果をまとめたものであり、全5章により構成されている。</p> <p>第1章は序論であり本研究の背景と目的を示している。</p> <p>第2章では、塩害を受けるコンクリート構造物の断面修復工法、塩害に対するコンクリート混和材の効果および電気化学的鉄筋防食工法に関わる既往の研究を整理し、本論文で取り組む課題を示している。</p> <p>第3章では、カルシウムアルミネートを主成分とする塩素固定化材について、混和するセメントの種類を普通ポルトランドセメント以外の早強および低熱ポルトランドセメントとした場合でも塩素固定化能力を発揮することを確認している。また、塩素固定化材を混和することにより、モルタルのフローダウンと乾燥収縮の増加が認められたが、塩素固定化材の粒度のうち、10μm以下の微粒分をカットすることにより、塩素固定化能力は変わらず、これらの特性がある程度緩和することを確認している。</p> <p>次に、一般的な断面修復材として用いられるポリマーセメントモルタルに混和した場合の物性について検討を行い、モルタル硬化体中でカルシウムアルミネートから生成したハイドロカルマイトが可溶性塩化物イオンを固定化するため、塩化物イオンの浸透が大幅に抑制されることを確認している。</p> <p>また、塩害を受けたコンクリート構造物の断面修復工法を模擬し、塩化物イオンを含んだコンクリートと塩素固定化材を混和した断面修復材とを打ち継いだ供試体を作製し、打継界面における塩化物イオンの拡散挙動について、実験的な検討を行っている。その結果、打継界面付近の可溶性塩化物イオンは、コンクリートからモルタル側に、塩素固定化材を混和しないモルタルを打ち継いだ場合よりも多く移動し、界面付近のコンクリート側の可溶性塩化物イオンは大きく減少し、界面付近のモルタル側の固定化塩化物イオンが卓越して増加することを確認している。また、この塩化物イオンの拡散挙動は、可溶性塩化物イオンがFickの法則による拡散に従い、塩化物イオンの固定化の割合および固定化の上限値を導入することで数値解析的に再現することが可能であることを示している。さらにこの解析モデルを用いて、断面修復工法を実施する場合のライフサイクルコストを試算した結果、想定する供用年数により最適な断面修復深さがあることを示している。また、長期の耐久性を考慮する場合、断面修復材に塩素固定化材を混和することで、断面修復工法におけるライフサイクルコストを小さく抑えることを提示している。</p> <p>第4章では、塩害を受けたコンクリート構造物の断面修復工法を模擬した鉄筋コンクリート供試体を作製し、断面修復工法と併用する犠牲陽極材の鉄筋腐食抑制性能について、躯体コンクリート強度、躯体コンクリート中の塩化物イオン量、暴露環境温度、犠牲陽極材の設置位置等によりどのような影響を受けるか実験的に検討している。</p> <p>その結果、犠牲陽極材を断面修復材内部に設置する供試体は、躯体コンクリート強</p> |                                               |    |       |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |        |    |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|----|-------|
| 京都大学                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 博士（工学） | 氏名 | 宮口 克一 |
| <p>度が <math>21\text{N/mm}^2</math> かつ、塩化物イオン量が <math>10\text{kg/m}^3</math> で環境温度が <math>35^\circ\text{C}</math> の厳しい腐食環境下における暴露条件では、6 か月ほどで鉄筋の腐食が発生し、鉄筋防食効果の持続性に課題が残ることを確認した。一方、犠牲陽極材を打継界面付近の躯体コンクリートの外部に設置する供試体は、同じ条件でも鉄筋の腐食を抑制する防食効果が持続していることを確認した。また、この犠牲陽極材を外側に設置した供試体は、内部に設置した供試体に比べて躯体コンクリート側の鉄筋の防食範囲が広くなり、特に犠牲陽極材を設置した直下にある鉄筋の腐食抑制効果が高く、効果的に鉄筋を防食できる方法であることを提示している。さらに、この犠牲陽極材を打継界面付近の躯体コンクリートの外側に設置する供試体の犠牲陽極材設置部に有機-無機複合型塗膜養生材を塗布したものは、躯体コンクリート側の鉄筋防食効果が向上することを確認している。また、塩素固定化材を混和したポリマーセメントモルタルを断面修復材に用いると、断面修復材側の鉄筋防食効果が向上することを確認している。断面修復工法を適用する際にこれらを用いることで、さらに鉄筋防食性能が向上することを示している。</p> <p>また、犠牲陽極材の鉄筋腐食抑制性能について、鉄筋の復極量、防食電流密度、分極抵抗および鉄筋腐食電流密度を防食効果の評価パラメータとして検討し、どのパラメータも評価項目として妥当な閾値をもったものであることを確認している。そこで、鉄筋の防食効果を鉄筋防食率で評価し、その評価指標として防食電流密度および復極量を検討し、その結果、各々鉄筋防食率の評価指標として妥当な基準値をもつことを確認している。断面修復工法に犠牲陽極材を併用する防食工法は、暴露環境や躯体コンクリート中の塩化物イオン量にもよるが、断面修復界面から <math>200\text{mm}\sim 800\text{mm}</math> 程度の位置にある鉄筋にも防食抑制効果を発揮する工法であることを確認している。</p> <p>さらに、犠牲陽極材を設置した場合の鉄筋コンクリート内の電位および電流分布について、ラプラスの式に基づいた境界要素法による数値解析を実施し、その手法はおおむね有効であることを確認している。その結果に基づき、犠牲陽極材を用いた防食工法のライフサイクルコストを試算した結果、想定する供用年数により、最適な犠牲陽極材の設置条件が異なることを示している。特に 50 年以上の長期耐久性を想定する場合、犠牲陽極材は外部設置とした方がライフサイクルコストを抑えることができることを示している。</p> <p>第 5 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、上記の成果を取りまとめ、想定する環境や耐用年数において、効果的かつ経済的な断面修復工法の工法選定のフローを提案し、今後の課題について述べている。</p> |        |    |       |

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、塩害を受けたコンクリート構造物の対策として一般的な対策のひとつである、断面修復工法を検討の対象とし、その耐久性をより高める方法について検討を行い、効果的かつ経済的な断面修復工法の仕様を提案することを本研究の目的として取り組んだ、一連の研究成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 塩素固定化材を断面修復材に混和することで、可溶性塩化物イオンが固定化され、塩化物イオンの浸透が大幅に抑制されることで、塩害を受けるコンクリート構造物の断面修復材として高い耐久性を示すことを明らかにしている。
2. 塩素固定化材を混和した断面修復材と塩化物イオンを混和したコンクリートの打継界面付近では、モルタル側の固定化塩化物イオンが卓越して増加し、コンクリート側の可溶性塩化物イオンは大きく減少することを明らかにしている。
3. 塩素固定化材を混和した断面修復材への塩化物イオンの拡散挙動は、可溶性塩化物イオンが Fick の法則による拡散に従い、塩化物イオンの固定化の割合および固定化の上限値を導入することで数値解析的に再現することが可能であることを示し、この解析モデルを用いて、断面修復工法を実施する場合のライフサイクルコストを試算した結果、想定する供用年数により最適な断面修復深さがあることを明らかにしている。
4. 犠牲陽極材を外側に設置したものは、内部に設置したものに比べて躯体コンクリート側の鉄筋の防食範囲が広くなり、特に犠牲陽極材を設置した直下にある鉄筋の腐食抑制効果が高いことを明らかにしている。
5. 断面修復工法と犠牲陽極材を併用した鉄筋防食工法において、その防食効果を鉄筋防食率で評価し、その評価指標として鉄筋に流れる防食電流密度および復極量が妥当な基準値をもつことを明らかにしている。
6. 得られた知見をもとに、想定する環境や耐用年数において、効果的かつ経済的な断面修復工法の工法選定のフローを構築・提案している。

以上要するに、本論文は塩素固定化材を用いた断面修復材と犠牲陽極材を併用した断面修復工法における鉄筋防食性能に関する研究であって、断面修復工法に塩素固定化材および犠牲陽極材を用いることで、想定する耐用年数に応じた最適な工法設計を容易にすることで、塩害を受けるコンクリート構造物の断面修復工法の耐久性の向上に多大に貢献する研究であり、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、平成 26 年 12 月 17 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。

