

論文 / 著書情報
Article / Book Information

| | |
|-------------------|---|
| 題目(和文) | 腐食ひび割れを有する鉄筋コンクリートの電気防食における合理的な前処理と適切な回路分けに関する研究 |
| Title(English) | Streamlined Pretreatment and Appropriate Circuit Separation for Cathodic Protection on Reinforced Concrete with Corrosion-induced Cracks |
| 著者(和文) | 邊木 園慧 |
| Author(English) | Akira Hekizono |
| 出典(和文) | 学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第338号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種類:課程博士, 審査員:岩波 光保,高橋 章浩,佐々木 栄一,千々和 伸浩,丸山 泰蔵 |
| Citation(English) | Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第338号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,, |
| 学位種別(和文) | 博士論文 |
| Category(English) | Doctoral Thesis |
| 種別(和文) | 要約 |
| Type(English) | Outline |

論文要約

THESIS OUTLINE

| | | | | | |
|--|-----------------|----------|---|-----------------|--------|
| 系・コース： Department of, Graduate major in | 土木・環境工学 土木工学 | 系 コース | 申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested | 博士 Doctor of | (工学) |
| 学生氏名： Student's Name | 邊木 蘭 慧 | | 審査員主査： Chief Examiner | 岩波 光保 | |

インフラの主要な構成要素である鉄筋コンクリート (RC) 構造物を健全な状態に維持管理することは、安全で安心な国民生活や社会の持続的発展の基盤である。しかしながら、鉄筋の腐食にともなう断面減少、コンクリートのひび割れ、鉄筋とコンクリートの剥離、かぶりコンクリートの剥落などにより、RC 構造物は要求性能を満たせなくなる。これらの腐食劣化に対する防食対策として、電気防食が有効な手法として広く用いられている。電気防食は、部材表面近傍に設置した陽極からコンクリートを介して鉄筋に電流を供給することで腐食速度を低減させる防食法であり、腐食という電気化学反応そのものの進行を制御する特徴を持つ。そのため、酸素や水、塩化物イオンなどの腐食因子の浸透や蓄積の影響を受けにくく、既に鉄筋の不動態皮膜が破壊されて腐食が進行している場合でも防食可能である。また、防食効果を定量評価できる点も大きな利点である。

ただし、既設構造物に対する電気防食においては適切な前処理が不可欠である。既設構造物には、浮きや豆板、鉄筋の錆やコンクリートのひび割れ、スペーサなどの金属類、高抵抗材料を用いた断面修復部やひび割れ注入部、防錆剤、表面被覆部や表面含浸部など、防食電流の流れを阻害し防食効果を損なう可能性のある部位が存在する。これらの阻害要因を事前に適切に処理することが求められ、これを電気防食の前処理と呼ぶ。一般的には、防食電流の阻害が懸念される部位をはつり取り、母材コンクリートと同程度の電気抵抗率を有するモルタルで断面修復を行うことが前処理の基本とされている。断面修復を前処理とした電気防食は、多くの施工実績の中で高い防食効果が確認されている。しかし、部材に含まれる防食効果の阻害要因はその規模や防食効果への影響度が様々であり、必ずしも断面修復が唯一の適切な前処理とは限らない。特に、鉄筋表面の錆やコンクリートのひび割れが電気防食に与える影響に関する近年の研究を勘案すると、腐食ひび割れについてはひび割れ部をセメント系材料で充填するなどの簡略化された補修が合理的な前処理となる可能性がある。しかしながら、現状では種々の前処理に応じた電気防食効果を検討した事例がないため、不経済や非効率の懸念がありつつも、信頼性の高い断面修復を前処理とせざるを得ないことが課題となっている。

以上のことより、本論文では腐食ひび割れが生じた RC 部材を対象として前処理に応じた防食効果を評価し、合理的な前処理を提案することを目的とした。ただし、前処理の合理性は補修に応じた局所的な電気防食の可否だけでなく、防食回路全体における電流分配の適切性を含めて議論する必要がある。すなわち、前処理部だけでなく、健全部、軽度腐食部、未補修部などを含む防食回路における電流分配を明らかにし、必要に応じて適切な回路分けを行うことが求められる。以上より、本論文の目的は以下の 2 点である。

1. 前処理に応じた電気防食効果の評価に基づいて、合理的な前処理を提案すること。

2. 異なる腐食程度の部位や前処理部を含む防食回路における電流分配の評価に基づいて、適切な回路分けを提案すること。

これらの目的を達成するため、鉄筋とコンクリートあるいはモルタルで作製された試験体を用いた通電実験と、試験体内の電流分布や鉄筋のカソード分極量を算出する数値シミュレーションを行った。

本論文は5つの章から構成されている。

第1章では、研究の背景としてRC構造物の効率的な維持管理に関する社会的要請、電気防食および前処理の意義と課題を述べ、本研究の目的と論文の構成を示した。

第2章では、RC構造物における種々の防食技術や電気防食の方式を示し、防食技術における電気防食の位置づけ、さらには本論文で採用した線状陽極方式および外部電源方式の電気防食について説明した。さらに、断面修復を前処理とした電気防食の研究、前処理の対象とされている鉄筋の腐食やコンクリートのひび割れが電気防食に与える影響に関する研究を紹介し、前処理の合理化を目的とする本研究の位置づけを示した。

第3章では、合理的な前処理を提案するために、腐食ひび割れを模擬した試験体の前処理に応じた電気防食効果を評価した(目的1)。力学的割裂により鉄筋間の水平な腐食ひび割れを模擬したRC試験体に対して、簡略化された断面修復、ひび割れ注入補修、前処理なしの3条件を適用して電気防食を実施し、その防食効果を評価した。簡略化された断面修復としてはつり深さが鉄筋裏から鉄筋の中心高さまで低減された断面修復、さらに補修材料として母材コンクリートの約5.6倍の高抵抗材料が用いられた断面修復を適用した。ひび割れ注入補修として、鉄筋間の水平な腐食ひび割れを全面的に閉塞させた注入補修と、ひび割れ面中央部を局所的に閉塞させた注入補修を適用した。簡略化された断面修復の2ケースでは、電気防食による電気防食効果が確認された。一方で前処理なしのケースでは、電流が安定せず電気防食や電気化学的測定が困難であったことから、前処理は必要であると結論付けられた。異なる補修面積のひび割れ注入補修を模擬した2ケースでは、試験体表面に設置された陽極から、全面的あるいは局所的な補修部を介して鉄筋裏に電流を供給することが可能であると明らかになった。一方で、防食効果の有無は実験のみでは明確にならなかったため、数値シミュレーションによってコンクリート内の電流分布と鉄筋のカソード分極量を算出した。数値シミュレーションの結果、鉄筋の分極抵抗次第で大小は変化するものの、ひび割れ注入補修を前処理とした電気防食では、鉄筋が十分にカソード分極されて防食効果が得られることを示した。また、補修面積が広い方が電流分布の均一性が高まることを確認した。

防食効果が得られる具体的な前処理方法の提案を目的として、鉄筋入りモルタル試験体を用いた電気防食実験を実施した。乾湿繰返しにより腐食ひび割れを生じさせた鉄筋入りモルタル試験体に、前処理として水道水や亜硝酸カルシウム水溶液の先行注入と超微粒子セメントを用いたひび割れ注入補修を実施し、通電実験によって電気防食効果を評価した。通電実験後の腐食減量試験の結果から、断面修復には劣るものの、上述の前処理を実施した試験体における明確な電気防食効果を確認した。さらに、電気化学的測定の結果から、亜硝酸カルシウム水溶液の先行注入と超微粒子セメントを用いたひび割れ注入補修を前処理としたケースで高い防食効果が得られた主たる要因は、亜硝酸カルシウム水溶液による鉄筋周囲の導電性の向上および鉄筋の不動態化であると考察した。

第4章では、適切な回路分けを提案するために、腐食程度や前処理が異なる鉄筋入りモルタル試験体を用意し、これらを並列接続した模擬電気防食回路における電流分配を調査した(目的2)。モルタル試験体中の鉄筋の腐食程度を健全、ひび割れなしの軽度腐食、ひび割れ幅0.8mm未満の腐食ひび割れ(小)、ひ

び割れ幅 0.8mm 以上の腐食ひび割れ（大）の 4 段階に調整した。さらに腐食ひび割れ（大）に該当する試験体には水道水の先行注入と超微粒子セメントを用いたひび割れ注入補修を実施して、腐食程度および前処理が異なる 4 種類の試験体を用意した。これらを並列接続することで 1 つの防食回路とし、湿潤環境および乾燥環境における各試験体への電流分配を調査した。各環境における電流分配を明らかにすることに加えて、鉄筋の腐食程度やモルタルのひび割れおよび乾燥状態が電流分配に与える影響を、鉄筋の分極抵抗や試験体の液抵抗に基づいて考察した。さらに、24 時間復極量、試験体の電流密度、鉄筋の通電電位を指標として設定した防食管理基準に基づき、各環境における適切な回路分けの考え方を示した。湿潤環境においては、腐食が深刻な試験体ほど多くの電流が分配されることが確認された。これは、試験体の含水率が高まることで液抵抗 R_s が抑制され、鉄筋の分極抵抗 R_{pc} が電流分配の主たる決定要因になったことに起因すると考察した。また、湿潤環境では腐食した試験体においてカソード分極量を大きくするために電流を増大させる必要があるが、健全試験体の分極量が過大となり不経済が懸念されたため、腐食の有無に応じて回路分けを行うことが適切であると判断した。さらに、腐食した試験体においても腐食ひび割れの有無で復極量が大きく異なる場合には、これらの回路分けも必要であると考えた。湿潤環境から乾燥環境への変化直後では、乾燥にともなって健全試験体に電流が集中し、他の腐食試験体の電流が減少することが確認された。健全試験体の通電電位が、水素発生に伴う鉄筋-コンクリート間の付着力低減が懸念される -1000 mV vs CSE まで卑化するリスクが懸念されたため、腐食の有無で回路分けを行うことが適切であると判断した。定常的な乾燥環境では、電流分布には問題がないものの、ひび割れが生じた試験体では前処理が必要となることから、これらは回路から取り除かれ、補修されるべきであると判断した。

また、第 4 章の水道水の先行注入と超微粒子セメントのひびわれ注入補修を実施した試験体について、通電実験後に鉄筋-モルタル間の剥離が確認され、電気防食効果が得られていないことが確認された。一方で、第 3 章では同じ前処理を実施した試験体では電気防食効果が得られていた。電気防食効果の有無におけるこの違いは、主に前処理を行う際の腐食程度の違いに起因すると考察され、鉄筋-コンクリート間の剥離が生じた場合には、水道水の先行注入と超微粒子セメントのひびわれ注入補修による前処理では電気防食効果が得られない可能性があると考えた。以上より、本研究のひび割れ注入補修による前処理には適用限界があり、その適用限界は鉄筋-コンクリート間の目視可能な剥離が生じる腐食程度であると結論付けた。また、この適用限界に対応する試験体のひび割れ幅は $0.95 \text{ mm} \sim 1.2 \text{ mm}$ であった。

最後に、第 5 章では各章の概要を述べ、得られた知見を総括した。さらに、本論文の結論として腐食ひび割れを有する RC に対する電気防食の合理的な前処理と適切な回路分けを提案し、今後の課題について述べた。