

氏名	はやし りょうた 林 亮太		
学位の種類	博士（工学）		
報告番号	甲第 1898 号		
学位授与の日付	令和 3 年 9 月 13 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当（課程博士）		
学位論文題目	コンクリートの透気性を考慮した実構造物の劣化進展予測法に関する研究		
論文審査委員	(主 査) 福岡大学	教授	添田 政司
	(副 査) 福岡大学	教授	村上 哲
	九州大学大学院工学 研究院社会基盤部門	教授	濱田 秀則

内 容 の 要 旨

現在コンクリート構造物の維持管理は、定期点検、対策・調査要否の判定、詳細調査、劣化機構の推定、補修設計、補修工事、補修後の維持管理の流れで行われている。構造物の劣化の進行は、各劣化機構や各種環境下、部位・部材などによって大きく異なっているため、その進行を予測することは維持管理を行う上で非常に重要である。現在では、大半の構造物が今後の劣化の進行を予測して維持管理するまでに至っていないのが現状である。

一方、構造物における劣化の進行の予測方法には、中性化の場合は \sqrt{t} 則、塩害の場合は塩化物イオンの拡散の予測などがある。しかしながら、これらの予測は腐食ひび割れが発生する前の期間（潜伏期～進展期）を予測するものであり、加速期前期以降の予測の方法が確立していない。また、鋼材腐食の進行予測方法についても劣化過程ごとに定められているが、いずれも定量化されるまでに至っていないのが現状である。

本研究では、まず実構造物の実態の把握を目的として、実構造物のかぶり、鋼材腐食に影響を及ぼす塩害および中性化、水掛かりについて実構造物を調査して現状を把握した。かぶりの調査では、かぶりの変遷、スペーサーの設置、建設された時期の時代背景などを考慮して、かぶり不足の実態を把握した。また、鋼材腐食に起因する中性化、塩害と水掛かりの有無に着目し、これらの損傷を受けた実構造物を調査した。調査結果を基に、かぶりの大小が鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度 (C_{lim}) に与える影響、既往の研究実績に基づく方法として類似の環境および構造物の点検結果などが無い場合に用いる現行規定の表面における塩化物イオン濃度 (C_0) に対し、時代背景などを踏まえ実構造物の調査結果の安全性の判定を考察した。

次に、室内実験により作製した円柱供試体と実構造物から採取したコア供試体におけ

る透気係数と各種物質移動抵抗性の関係性を明らかにして、実構造物への適用性を把握した。さらには、透気係数による鋼材腐食の評価の可否を確認するために、腐食電流密度、相対湿度、可溶性塩化物イオン濃度、腐食重量の関係性を明らかにした後で、透気係数と腐食電流密度の関係式を導き出した。この関係式を用いて、実構造物のコア供試体から計測した透気係数を基に腐食電流密度を推定し、実構造物の外観変状の状態と照合することで関係式の有用性を確認するとともに、鋼材の腐食抵抗性に関する検討を行った。

上記で得られた結果を基に、鋼材腐食の進行予測方法の確立に向けて、コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測の方法を提案することを目的とした。

第1章では、研究の背景として土木学会の定める基本的な維持管理の手順を基に、日本における社会基盤の維持管理の現状を概説し、本論文の研究目的と本論文の各章の構成を示した。

第2章では、実構造物の調査結果および暴露試験を対象とした研究報告、透気係数による物質移動抵抗性の評価に関する既往の研究、予測方法、予測に関する研究を整理し、これまでに明らかとなっている点と課題点について述べた。

第3章では、鋼材腐食の進行に影響を及ぼすかぶりに着目し、塩害環境下の実構造物の状況の把握を目的として、実構造物の実測かぶりと設計上最低限必要な最小かぶりを年代ごとで整理するとともに、鋼材位置の塩化物イオン濃度と腐食グレードをかぶりごとで整理し、かぶりが鋼材腐食に与える影響を明らかにした。これらの関係性を基に、鋼材腐食開始の指標となる C_{lim} に関する知見を示した。

第4章では、塩害環境下の二つの異なる地域の構造物に着目し、既往の研究実績に基づく方法として定められた現行規定の C_0 に対し実構造物の調査結果が、安全側、あるいは危険側かを部材および水掛かりの有無ごとに海岸からの距離と C_0 の関係性を整理・評価した。

第5章では、塩害、中性化により劣化した実構造物の状況の把握を目的として、様々な環境下の実構造物を対象に、コンクリート品質試験、鋼材の腐食グレードの調査結果を収集、整理し、建設年、時代背景、水掛かりの有無、構造諸元などの関係性を明らかにした。

次に、室内実験により作製した円柱供試体と実構造物から採取したコア供試体の透気係数と各種物質移動抵抗性の関係性を明らかにして、実構造物への適用性を示した。その上で、透気係数による鋼材腐食の評価の可否を確認するために、腐食電流密度、相対湿度、可溶性塩化物イオン濃度、腐食重量の関係性を明らかにした後で、透気係数と腐

食電流密度の関係式を導き出した。この関係式を用いて、実構造物の透気係数を基に腐食電流密度を推定し、実構造物の外観変状の状態と照合して、関係式の有用性を示した。

第6章では、第5章で得られた腐食電流密度と透気係数の関係式と実構造物のコア供試体から計測した透気係数を用いて腐食電流密度を推定し、この腐食電流密度から腐食速度へ変換させて、かぶりと鉄筋径を考慮した鋼材腐食の進行予測を行い、外観変状の状態と比較してその有用性を確認した。これらの結果を基に、コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測の確立に向けた鋼材腐食の進行予測方法の提案を行った。

この提案により、これまで予測できなかった鋼材腐食の進行が、実構造物からコアを採取し、透気係数を計測することで、コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測が可能となり、効率的な維持管理に繋がっていただけることを示した。

第7章では、本研究で得られた成果を取りまとめ、今後の展望を述べて本論文の結びとした。

審査の結果の要旨

論文の評価

本論文は、1950年から1980年代に竣工された道路橋および樋門などの延べ405箇所の実構造物の劣化状態の把握を行い、室内実験により作製した円柱供試体と実構造物から採取したコア供試体における透気係数と各種物質移動抵抗性の関係性を明らかにしている。さらに、透気係数による鋼材腐食の評価の可否を確認するために、腐食電流密度、相対湿度、可溶性塩化物イオン濃度、腐食重量の関係性を明らかにした後で、透気係数と腐食電流密度の関係式を導き出している。実構造物のコア供試体から計測した透気係数を基に腐食電流密度を推定し、実構造物の外観変状の状態と照合することで関係式の有用性を確認するとともに、鋼材の腐食抵抗性に関する検討を行っている。これらの結果を基に、鋼材腐食の進行予測方法の確立に向けて、コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測の方法を提案している。

第1章では、土木学会の定める基本的な維持管理の手順を基に、日本における社会基盤の維持管理の現状について述べている。

第2章では、実構造物の調査結果および暴露試験を対象とした研究報告、透気係数による物質移動抵抗性の評価に関する既往の研究、予測方法、予測に関する研究を整理し、これまでに明らかとなっている点と課題点について述べている。

第3章では、鋼材腐食の進行に影響を及ぼすかぶりに着目し、塩害環境下の実構造物の状況の把握を目的として、実構造物の実測かぶりと設計上最低限必要な最小かぶりを年代ごとで整理するとともに、鋼材位置の塩化物イオン濃度と腐食グレードをかぶりごとで整理し、かぶりが鋼材腐食に与える影響を明らかにした。これらの関係性を基に、鋼材腐食開始の指標となる“C”_{lim}に関する知見を示している。

第4章では、塩害環境下の二つの異なる地域の構造物に着目し、既往の研究実績に基づく方法として定められた現行規定の“C”₀に対し実構造物の調査結果が、安全側、あるいは危険側かを部材および水掛かりの有無ごとに海岸からの距離と“C”₀の関係性を整理・評価している。

第5章では、塩害、中性化により劣化した実構造物の状況の把握を目的として、様々な環境下の実構造物を対象に、コンクリート品質試験、鋼材の腐食グレードの調査結果を収集、整理し、建設年、時代背景、水掛かりの有無、構造諸元などの関係性を明らかにしている。また、室内実験により作製した円柱供試体と実構造物から採取したコア供試体の透気係数と各種物質移動抵抗性の関係性を明らかにし、実構造物への適用性を示している。透気係数による鋼材腐食の評価を、腐食電流密度、相対湿度、可溶性塩化物イオン濃度、腐食重量の関係性を明らかにし、透気係数と腐食電流密度の関係式を導き出している。この関係式を用いて、実構造物の透気係数を基に腐食電流密度を推定し、実構造物の外観変状の状態と照合して、関係式の有用性を示している。

第6章では、第5章で得られた腐食電流密度と透気係数の関係式と実構造物のコア供試体から計測した透気係数を用いて腐食電流密度を推定し、この腐食電流密度から腐食速度へ変換させて、かぶりと鉄筋径を考慮した鋼材腐食の進行予測を行い、外観変状の状態と比較してその有用性を確認している。これらの結果を基に、コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測の確立に向けた鋼材腐食の進行予測方法の提案を行っている。

この提案により、これまで予測できなかった鋼材腐食の進行が、実構造物からコアを採取し、透気係数を計測することで、コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測が可能となり、効率的な維持管理に繋げていけることを示している。

第7章では、本研究で得られた成果を取りまとめ、今後の展望についても記述している。

以上、本論文は、コンクリートの透気性を考慮して鋼材腐食の進行予測を可能とし、効率的な維持管理を行う上で有効な手法を示しており、工学的に有用な知見が得られている。

公聴会

公聴会には55名の参加者があり、申請者による約60分の説明の後、出席者から10件の質問があった。透気係数を測定するためのコア供試体採取位置やコア径の影響、透気係数と腐食電流密度の妥当性、鋼材腐食評価を行うための最小かぶりの定義などについて質問があり、論文申請者の適切な回答が行われた。

審査委員会の評価

本論文は、実構造物のコア供試体から計測した透気係数を基に腐食電流密度を推定し、実構造物の外観変状の状態と照合することで関係式の有用性を確認するとともに、鋼材の腐食抵抗性に関する検討を行ったものである。さらに、鋼材腐食の進行予測方法の確立に向けて、コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測方法を新たに提案し、新規性が高く、工学的に有用な知見が得られている。今後の、コンクリート構造物の維持管理に多に貢献するものと判定される。本論文の学術的価値は高く、実験の精度や記述も明確なことから、本論文は学位論文に値すると判定された。

<入力の際の注意> 必ずご確認ください

- 一番上の表中の氏名や論題は差込印刷になっています。
Wordに直接データを入力せず、FU_Box ¥【大学院共有】¥博士論文フォルダ内のExcel「20**年度*季 博士論文関係データ」令和*年度*季(課程博士)シート(当該年度のファイル、シート)に入力し、宛先として選択してください。
- FU_Boxの仕様により、差し込みの接続が外れる場合が想定されますので、その場合はその都度宛先を選択しなおす必要があります。
- 留学生の氏名は漢字(中国人や韓国人の場合)、アルファベット(漢字の氏名ではない場合)でお願いします。
- この入力フォームは原本となりますので、作成の際は、各研究科で適宜別名保存をするなどして作業をしてください。
- 内容の要旨、結果の要旨は MS 明朝 10.5 ポイントで入力してください。
- PDF化する際は、この<入力の際の注意>を削除し、PDF/A(ISO 19005-1)で作成してください。
- PDFのファイル名は k 報告番号.pdf としてください。
(kは半角小文字のケーです。全角、大文字での入力、余分なスペースの入力等は機関りポジトリ登録の際にエラーの原因になりますのでご注意ください。)
例：報告番号が甲第2016号の場合、 k2016.pdf
- PDF化したファイルは「FU_Box ¥【大学院共有】¥博士論文¥内容の要旨及び審査結果の要旨¥20**.*授与」(当該年度のフォルダ)に格納してください。