

氏名（本籍）	酒井正樹（東京都）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第1176号
学位授与の日付	2024年3月18日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮したRC造建築物の耐久性評価手法に関する研究

論文審査委員	（主査）教授 兼松 学
	教授 衣笠 秀行 教授 大宮 喜文
	教授 加藤 佳孝 教授 今本 啓一

論文内容の要旨

近年、高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート造（以下、RC造という）建築物の多くが建築後50年を経過し、使用を継続するか、解体するか判断が迫られている。既存の建築ストックを継続使用する選択がされると、経済性だけではなく、国連の持続可能な開発サミットで採択された「持続可能な開発目標:Sustainable Development Goals (SDGs)」の観点からも有益と言える。

RC造建築物の寿命を決める耐久性は、塩害や凍害など特殊な環境条件に置かれる場合を除き、設計から維持管理に至るまで、鉄筋腐食を引き起こす要因とされるコンクリートの中性化深さの進行に基づいて評価されてきた。一方、近年では、長期供用後に解体される既存RC造建築物を中心に耐久性調査が行われ、鉄筋位置までコンクリートの中性化が進行しても、鉄筋の腐食因子となる水分供給がない部位では、鉄筋腐食の進行は無視できる程度に小さいことが明らかとなった。この事実は、中性化の進行だけでRC造建築物の耐久性評価を行うと、まだ十分に継続使用が可能な建築物であっても、解体の判断が下されることを意味する。

こうした状況を背景として、RC造建築物の耐久性をコンクリートの中性化深さだけで評価するのではなく、中性化後の鉄筋腐食速度の進行を考慮して評価する考え方が議論されている。このような、中性化の進行を許容した上で、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮して耐久性を評価する考え方を採ることにより、従来の耐久性評価では解体の判断が下されていた既存のRC造建築物に対して、より長期間の供用を計画することが可能となる。

本研究は、RC造建築物の耐久性を対象として、従来のコンクリートの中性化を指標とし

た耐久性評価手法に対して、コンクリートの中性化後における鉄筋腐食の進行を考慮した新たな耐久性評価手法の構築を目的とした実験的研究である。

中性化後における鉄筋腐食の進行を予測するためには、鉄筋腐食の挙動を速度として捉える必要がある。金属腐食化学の理論では、大気中における鉄の腐食速度は、鉄の溶解速度と酸素の拡散速度で整理される。一方、RC 造建築物では、鉄筋周囲は多孔体のコンクリートに覆われており、同様の理論をそのまま適用することは難しい。また、既存 RC 造建築物の耐久性調査結果から理論を構築しようとしても、コンクリートの使用材料や強度、供用期間中の環境条件が一定ではないため、鉄筋腐食速度を定量的に示すことは困難であった。

そこで本研究では、使用材料や強度などの条件を揃えて、かぶり厚さを変えた鉄筋コンクリート試験体を用いて、鉄筋位置の水分状態を変えて、中性化後における鉄筋腐食速度を測定した。これにより、外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度を取得し、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を定式化した。この実験結果を基に、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した新たな耐久性評価手法を提案した。

また、実設計において再利用を計画した既存 RC 造建築物に対して、提案した耐久性評価手法を適用し、その実行性を確認した。加えて、乾湿繰返しを受ける部材に対しても、水分移動解析によりコンクリート中の水分状態を予測し、中性化後の鉄筋腐食速度を算定することで、提案した耐久性評価手法が適用できることを確認した。

本研究の結論を以下に示す。

- (1) 使用材料や強度などの条件を揃えて、かぶり厚さを変えた鉄筋コンクリート試験体を用いて、鉄筋位置の水分状態を変えて、中性化後における鉄筋腐食速度を測定する実験的検討を行った。これにより、外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度を取得し、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を定式化した。
- (2) 外部環境が一定条件の下での、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係は、セメント種別、水セメント比、混和材を高含有したコンクリートのいずれに対しても、同様の傾向となることを確認した。
- (3) 外部環境が一定条件の下での、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係は、中性化残りが 0mm 以下ではほぼ同等とみなせる範囲であり、中性化深さがかぶり厚さに到達した以降の鉄筋腐食速度は、ほぼ一定とみなせることを確認した。
- (4) 外部環境が一定条件の下での、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係は、ひび割れ部においても同様の傾向が認められた。
- (5) かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係に基づいて、中性化後の鉄筋腐食を考慮した新しい耐久設計手法を提案した。
- (6) 実設計において再利用を計画した既存 RC 造建築物に対して、提案した耐久性評価手法を適用し、その実行性を確認した。
- (7) 乾湿繰返しを受ける部材に対して、水分移動解析によりコンクリート中の水分状態を予

測し、中性化後の鉄筋腐食速度を算定することで、提案した耐久性評価手法が適用できることを確認した。

本研究の構成を以下に示す。

1 章では、本研究の背景、目的、構成を示した。

2 章では、中性化を指標とした耐久性評価手法、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法、コンクリート中の鉄筋腐食速度の測定方法について、調査の研究を取りまとめた。

3 章では、使用材料や強度などの条件を揃えて、かぶり厚さを変えた鉄筋コンクリート試験体を用いて、鉄筋位置の水分状態を変えて、中性化後における鉄筋腐食速度を測定した。これにより、外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度を取得し、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を定式化した。

4 章では、3 章で定式化した外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度に基づいて、中性化後の鉄筋腐食を考慮した新たな耐久性評価手法を提案した。さらには、実設計において再利用を計画した既存 RC 造建築物に対して、提案した耐久性評価手法を適用し、その実行性を確認した。

5 章では、乾湿繰返しを受ける部材に対して、水分移動解析を介することにより、提案した新たな耐久性評価手法が適用できることを確認した。

6 章では、本研究の結論として、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した RC 造建築物の耐久性評価手法に関する研究全体を取りまとめた。

以 上

論文審査の結果の要旨

一般環境下に置かれる鉄筋コンクリート造建築物の耐久性は、永きにわたってコンクリートの中性化深さの進行を指標として評価・設計されてきた。しかしながら、近年の長期供用された既存 RC 造建築物の耐久性調査の結果、コンクリートの中性化が進行しても、鉄筋腐食の因子となる水分供給が無い部位においては、鉄筋腐食の進行は無視できる程度に小さいことが明らかになってきている。このような背景から、近年では中性化深さによる耐久性評価・設計に代わり、鉄筋腐食の進行を指標とする耐久設計手法の構築が課題となっている。このような考え方は、既に長期供用して中性化が進む構造物を継続して使用する場合や、中性化進行の早い材料、例えば近年検討が進む環境対応材料の利用の場面において、中性化に基づく耐久性評価に代わる新たな評価手法の構築を後押しする要因となっている。

本研究は、鉄筋コンクリート造建築物の耐久性を対象として、従来のコンクリートの

中性化を指標とした耐久性評価手法に対して、コンクリートの中性化後における鉄筋腐食の進行を考慮した新たな耐久性評価手法の構築を目的としたものである。

本研究は6章から構成される。

第1章では、本研究の背景、目的、構成を示した。

第2章では、中性化を指標とした耐久性評価手法、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法、コンクリート中の鉄筋腐食速度の測定方法について、既往の研究を取りまとめ、本研究の学術的背景を総括した。

第3章では、使用材料や強度などの条件を揃え、かぶり厚さを変えた鉄筋コンクリート試験体を用いて、鉄筋位置の水分状態を変えて、中性化後における鉄筋腐食速度を実験的に検証した。これにより、外部環境が一定条件の下での、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係は、セメント種別、水セメント比、混和材を高含有したコンクリートのいずれに対しても、同様の傾向となることを確認した。また、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係は、中性化残りが0mm以下ではほぼ同等とみなせる範囲であり、中性化深さがかぶり厚さに到達した以降の鉄筋腐食速度は、ほぼ一定とみなせることを確認した。これらの実験的成果を踏まえ、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を定式化した。

第4章では、3章で定式化した外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度に基づいて、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度を考慮した新たな耐久性評価手法を提案した。さらには、実設計において再利用を計画した既存鉄筋コンクリート造建築物に対して、提案した耐久性評価手法を適用してその性能を検証し、本手法の有用性を示した。

第5章では、外部環境において降雨などにより乾湿繰返しを受ける部材に対して、水分移動解析を介することにより、提案した新たな耐久性評価手法が適用できることを確認した。

第6章では、本研究の結論として、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮したRC造建築物の耐久性評価手法に関する研究全体を取りまとめた。

本研究は、鉄筋の腐食を指標とした新たな鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計手法の構築を最終目標としたもので、100年に及ぶ旧耐久設計を新たにする試みとしてその工学的意義を高く評価する。特に、広範かつ長期に及ぶ実験的研究に基づき、水分環境および部材仕様に応じて定式化された信頼性の高い腐食速度予測式を提案した点において、その学術的価値は極めて高く、今後の耐久性研究の発展のみならず、近年実用化が進む環境対応技術の利用推進に大きく貢献することが期待される。

以上の成果は、工学的・学術的価値は極めて高いと判断し、本論文が博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認める。