

論文の内容の要旨

論文題目 マルチスケールモデルに基づく構造・鋼材腐食連成解析手法の構築

氏 名 鈴木 三馨

1903（明治 36）年，琵琶湖疏水路上にかけられた田辺朔郎設計のメラン式桁橋の道路橋（橋長 7.3m）が日本最初の鉄筋コンクリート橋とされる。同年広井勇が，工学会誌において「鉄筋混凝土橋梁」を發表し，「欧米では普通の方法として各種工事に使われていること，鐵材に乏しい日本においては工費の節約，構造物の耐久性確保の点において鉄筋コンクリートに勝るものはない」とし，新材料の有用性を指摘している。明治の新時代を迎えた日本は，世界史の奇跡と言われるほど短期間に，鉄道や港湾，河川改修など近代国土の建設を成し遂げた。鉄筋コンクリート技術が日本の一端を担っていたといっても過言ではない。2018 年現在までに，日本の長さが 15m 以上の道路橋の総数は約 16 万橋（2m 以上で約 70 万橋），トンネルの総数は約 1 万箇所と，膨大な数の鉄筋コンクリート構造物（以下，RC 構造物）が，社会基盤として社会経済活動を支えている。重要な社会基盤施設は長期にわたり供用されることでストック効果により社会の生産性を高める効果を担っており，数十年から数百年の長期に渡って，安全性，使用性，復旧性を確保する耐久性性能を満足することが要求される。また，RC 構造物は特に高度経済成長期に多く建設されており，今後建設から 50 年を超える RC 構造物の数は急激に増加し，その適切な維持管理が喫緊の課題となっている。

しかし，性能の経時変化を考慮して安全性，使用性，復旧性等の性能を時間の関数として評価するのは，現段階では難しく，また設計段階では必ずしも合理的ではないとされている。2017 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕では，設計耐用期間中の環境作用に対して材料の劣化や物質の透過に対する抵抗性等を確保した上で，構造物の安全性，使用性，復旧性等の要求性能に関する照査を行う方法がとられている。

一方，ハードウェアである計算機の指数関数的な速度・容量の増加およびハードウェアの性能を引き出す OS やコンパイラ等のソフトウェアの急速な発展により，数値解析技術は土木分野でも広く利用されるようになってきた。RC 構造物の耐久性性能の予測解析に対しても，安全性，使用性，復旧性の性能を経時変化を考慮して時間の関数として評価することが可能になり，既設構造と材料の挙動を時間軸で予測する数値解析技術の要望も高まっている。現に，東京大学コンクリート研究室が開発している RC 構造のマルチスケール統合解析システム DuCOM-COM3（以下，DuCOM-COM3）は，材料と構造機能の変化を同時に逐次計算することにより，微細な空隙に存在する水分の状態から収縮やクリープを予測評価し，橋梁全体のたわみ量を推定することを可能にしている。

島国であり沿岸部が多い我が国では，塩害による劣化によりコンクリート構造物の健全性が

低下している事例が少なくない。塩害を受けた既存の RC 構造物に対しても、地震応答解析と同様に、残存機能や復旧性を調査し、劣化に応じて合理的な補修・補強を実施しなければならない。

RC 構造物はひび割れなどの欠陥部の存在、劣化要因の侵入の不均一性等により、コンクリート内の鋼材が局所的に腐食するマクロセル腐食が進行するため、実環境で生じる可能性の高いマクロセル腐食の鋼材の腐食速度に及ぼす影響を把握することが肝要となる。高炉スラグ微粉末（以下、BFS）やフライアッシュ（以下、FA）等の混和材を用いたコンクリートは、材齢が経過しても塩分の分布が変化しない等、その特徴的な塩分遮塩性能についても報告されている。さらに、BFS、FA といった混和材を混合することでコンクリートの比抵抗が増加することが報告されており、腐食開始後のマクロセル腐食の腐食速度を減少させる効果も期待されるため、混和材を用いた RC 構造物の腐食開始後の塩害劣化に対する抵抗性を示すことができれば、CO₂ 排出抑制にも効果が期待されている BFS、FA といった混和材のさらなる有効利用につながるであろう。

本研究はこのような背景のもとに、塩害劣化作用を受ける RC 構造物において、水結合材比や混和材の混合率といった配合条件や外部の湿度といった環境条件を考慮し、腐食ひび割れ発生までの期間をシミュレートできるマルチスケールモデルに基づく構造・鋼材腐食連成手法システムの構築することをその最終的な目的とした。

以下に、本論文を構成する各章の概要ならびに得られた知見、成果を示す。

第 1 章では、本研究の背景や目的を示した。

第 2 章では、従来のマクロセル腐食を考慮した鋼材腐食解析手法の適用範囲を拡大することを目的として、既存の鋼材腐食解析手法の改良を行った。従来モデルの主な問題点として、1)1 対のアノード要素とカソード要素間のマクロセル腐食モデルにおいてミクロセル腐食モデルとの整合性が取れておらず、解析結果の信頼性が低いこと、2)コンクリート中の鋼材全体におけるマクロセル腐食モデルにおいてアノード面積とカソード面積の面積比依存が反映されていないことがある。そこで、カソード要素に着目し、マクロセル腐食電流密度の分配率を導入することで、1つのカソード要素と対となる他の複数のアノード要素間のマクロセル腐食電流密度の面積比依存を反映した。このようなモデル化により、RC 構造物中における鋼材のカソード面積に対するアノード面積比を反映した腐食速度の速いマクロセル腐食のモデル化がより適切なものとなったと考える。マクロセル腐食を模擬した塩水による乾湿繰返し実験に本解析手法を適用し、ひび割れ前のコンクリートの材料の不均一性が、腐食開始時期、塩化物イオン濃度および腐食量に与える影響を確認し、本解析手法の妥当性を検証した。

第 3 章では、配合や環境条件の影響を考慮できるコンクリートの比抵抗のモデル化を考案し、比抵抗測定実験との比較による検証を行った。コンクリート全体の比抵抗を骨材とセメントペ

ーストからなる直列並列複合回路によるものとし、正規化骨材体積率により、骨材体積率の影響を考慮したコンクリートの比抵抗モデルを構築した。これにより、正規化骨材体積率が 0.8 程度までのコンクリートの比抵抗の予測精度を向上させた。また、BFS の混合率の影響を考慮できるセメントペーストの比抵抗モデルの構築を目指し、a) 毛細管空隙とゲル空隙中の有効液状水量、および b) 毛細管空隙とゲル空隙の有効液状水中の電子の移動経路である屈曲度の影響を受けると仮定したモデルを構築した。これにより、BFS の混合率が 0~50% の範囲において、高精度なコンクリートの比抵抗の予測を可能にした。さらに、湿潤状態のコンクリートのみならず、乾燥状態のコンクリートの比抵抗の測定結果をデータベースとしたセメントペーストのモデル式を提案し、任意の水分状態におけるコンクリートの比抵抗の予測が可能とした。

第 4 章では、鉄筋コンクリート構造物に生じた荷重作用や腐食によるひび割れが腐食の進行に及ぼす影響を高精度に予測することを目指し、荷重作用に関する 3 次元非線形構造解析モデルと RC 部材中の塩化物イオン拡散とそれによる鋼材腐食をモデル化した 3 次元鋼材腐食解析モデル、そして、各解析モデル中の材料挙動に相互の解析結果を反映させる相互作用モデルを組合せた構造・鋼材腐食連成解析手法を構築した。定式化した腐食膨張率について検討を行った上で、マクロセル腐食を模擬した塩水による乾湿繰返し実験に本解析手法を適用し、ひび割れ前のコンクリートの材料の不均一性、構造解析との連成、腐食生成物の膨張率、およびひび割れた有限要素の拡散係数が、腐食開始時期、腐食ひび割れ発生時期、塩化物イオン濃度、および腐食量に与える影響を確認し、本解析手法の妥当性を検証した。

第 5 章では、2~4 章で構築した手法を用いて、BFS の有無をパラメータとした塩害による耐久性照査を試みた。耐久性照査は、1) コンクリートの比抵抗モデルを用いた鋼材腐食評価、2) 鋼材腐食解析手法を用いた鋼材腐食評価、3) 進展期末を限界状態とした耐久性照査、の 3 通りを試行した。コンクリートの比抵抗モデルを用いた鋼材腐食評価により、配合、環境条件、かぶり位置毎の簡易的な腐食リスクの判定を可能とし、BFS を混合することによる耐腐食性の向上を示すことができた。鋼材腐食解析手法を用いることで、配合や塩化物イオンのばらつきを考慮した進展期末を限界状態とした耐久性照査が可能となった。特に、既往手法では困難であった BFS の混合がコンクリート中の鋼材腐食の腐食速度に与える影響を改良した鋼材腐食解析手法を用いることで定量的に示すことが可能となった。

第 6 章では、本研究の結論を示した。

本研究では、塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の耐久性照査の合理化に必要となる、腐食開始から腐食ひび割れの発生、およびその後の腐食進展を含む腐食劣化プロセスを予測するための解析手法を構築した。最終的には本研究を通じて行ったモデルの適用範囲の拡大や高度化によって、任意の配合、環境条件においても予測精度の向上に寄与することを確認した。適用範

囲を拡大したコンクリートの比抵抗モデルを解析手法に組み込むことで、BFS の混合による耐腐食性を示すことが可能となり、鉄筋コンクリートの腐食レベルの簡易的算定および進展期末を限界状態とした耐久性照査が可能となった。