

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名

Raja Rizwan HUSSAIN

フセイン ラジャ リズワン

コンクリート構造物の耐久性を大きく損なう現象に鋼材腐食現象がある。アルカリ性を有するコンクリートは、内部の鋼材表面に不動態皮膜を形成させ、通常環境では腐食進行から保護しているが、一旦内部に塩化物イオンなどが浸透すると、それまで安定して存在していた不動態皮膜は破壊され鋼材腐食が開始される。海用から水や融雪剤などの作用を受ける場合、塩化物イオンの浸透に伴う鋼材腐食により構造物の寿命が大きく左右されるのである。近年、コンクリート構造物の耐久性能照査の枠組みが、国内外の設計コードにおいて整いつつある。例えば 2007 年に改訂されたコンクリート標準示方書【設計編】では、構造物内部の腐食発生を限界状態として設定し、中性化ならびに塩化物イオン浸透に起因する腐食発生に対する照査を明示するに至っている。中性化深さが鋼材位置に達しないこと、または鋼材位置の塩化物イオン濃度が規定量に達しないことで構造物の耐久性を担保しているが、鋼材腐食発生を限界状態としているため極めて大きいかぶり厚が要求されるなど、過度に安全側の評価になっているとの問題点が指摘されている。従って、任意の使用材料、配合、部材断面寸法・形状、あるいは様々な環境条件のもとで、鋼材腐食速度を予測する精度の高い一般化手法が照査技術として設計において強く求められている現状にある。本博士論文は、系統的な実験を通じて、温度、塩化物イオン濃度、空隙水 pH ならびに酸素供給量によって変化する鋼材腐食速度を定量的に捉え、熱力学・電気化学理論に基づく既存の鋼材腐食モデルを修正することによって、一般性の高い数値解析手法の提案に成功したものである。

本研究で得られた第一の成果として、塩化物イオンならびに系内の温度に強く影響を受ける鋼材腐食速度を与える数理モデルの高度化に成功した点が挙げられる。既存モデルでは、塩化物イオンの増加に伴いアノード側の Tafel 勾配が減少することのみで腐食速度の増大を表現していたが、塩化物イオンの増大に伴いアノード側の電位が減少することを新たにモデルに組み入れ、高塩化物イオン濃度領域(結合材に対して 5.0 質量%以上)を含む広範囲な条件に適用可能な数理モデルの提案に成功した。更に、20℃、40℃、60℃の三水準で実施した実験結果をベースとして、交換腐食電流密度にアーレニウス則に基づく温度依存型モデルを組み入れた鋼材腐食予測モデルの提案にも成功している。中東地域あるいは東南アジアなど、熱帯地域における鋼材腐食の進行が早いことが広く知られているが、温度依存性を適切に考慮可能な予測手法が提案されたことで、広範な地域・条件に対して鋼材腐食照査が可能となった工学的意義は大きい。

第二の成果として、コンクリートの配合、かぶり厚、内在塩分量および水分に関する境界条件を体系的に変化させ、腐食電位、鋼材腐食速度、ならびに半年、1 年後の腐食減量を測定することで、酸素供給量と鋼材腐食速度の関連を明らかにしたことが挙げられる。鋼材腐食現象が酸素供給で決定され

る反応か否か(酸素拡散律速反応か否か)については、現時点において未だ定説をみない論点である。本研究では、酸素拡散現象と鋼材腐食の関連を、マイクロ～ナノメートルの寸法を有する空隙構造、空隙内部の含水状態、あるいは微細構造の酸素拡散現象に着目し、酸素供給と酸素消費(鋼材腐食速度)の両者のバランスを、実験的に見ることによって明らかにしたものである。かぶり厚や配合といった巨視的な工学的パラメータのみで現象を捉えるのではなく、常時水中浸漬、95%RH 暴露、乾湿繰り返し、および常時室内設置といった 4 種類の環境条件に暴露し、系内の酸素供給量を制御することで酸素拡散律速の条件を抽出した点に、大きな学術上の価値が認められる。更に、水分平衡・移動モデル、空隙構造形成モデル、酸素拡散移動モデルと連成させた鋼材腐食進行解析により、実験結果との比較検討を行っている。氏の提案するモデルは概ね現象を追従しており、鋼材腐食モデルの妥当性が検証された。

第三の成果は、中性化の進行に伴う鋼材腐食現象を実験的に明らかにし、既存モデルとの検証を行ったことである。中性化残りが 5mm に達した時点で、腐食電位は卑の方向に移動し腐食の開始を示す結果となった。また pH 低下により増大する腐食速度についても解析モデルの検証に資するデータを提供し、モデルの妥当性を示すに至っている。

以上のように本研究では、温度、水分、塩化物イオン濃度、酸素供給量、および空隙水の pH など、多くの要因によって支配される鋼材腐食進行について、多くの体系だった実験により現象を明らかにし、それに基づく一般化モデルの提案、検証に成功した。工学的な貢献は大きいと認識され、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。