

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 高橋 佑弥

本研究は、セメント硬化体内部に存在するナノ寸法空隙中のイオン・液状水移動と、ミリメートルオーダーの空隙から構成される土粒子間粗大空隙場のイオン移動の両者を包括的に取り扱う熱力学数理モデルの構築を行うと共に、提案モデルを実装したマルチスケール統合プラットフォームによって、地下構造物の塩害進展解析ならびに実スケール地盤中の六価クロム溶出影響評価等の工学的応用に展開を図ったものである。具体的な研究成果と学術研究上の意義は、以下のように列挙される。

第1章では、研究の背景および既往の研究について整理し、社会基盤を構成する多様な多孔体材料を対象として、種々のイオンに対する遮蔽性能を評価する熱力学モデルと数値プラットフォームを構築することが、論文の目的であることを述べている。

第2章では、数ナノから数百ナノメートルの寸法を有する空隙場で展開される塩化物イオン移動現象に着目して、既存モデルの修正・高度化を行っている。小径・緻密な空隙を有する高品質なコンクリートの場合には、塩化物イオンに対して高い遮蔽性能を有することが既往研究より報告されているが、この特徴的とも言える塩分浸透抵抗性を、微小空隙中の微視的機構に立脚して説明を試みたものである。具体的には、空隙壁面と塩化物イオンの電気的作用や空隙相互の連結性等の要因によって、移動経路の寸法がある限界値を下回ると塩化物イオンが移動不可能になると仮定し、その妥当な閾値を過去の文献調査や感度解析より決定した。閾値以下の空隙およびそれらの空隙群に連結したインクボトル空隙の中に存在する液状水は、イオン移動の媒質として機能しないと仮定するものである。さらに塩化物イオンの輸送に大きく関わる液状水の移動モデルについても、空隙内部の間隙水圧勾配と壁面との摩擦抵抗の釣り合いを考慮することで、微小な空隙中の液状水移動が長期材齢で停滞することを数値モデルにより再現している。これら両者のモデルを組み合わせることによって、低W/Cコンクリートなどの高品質材料の高い塩分遮蔽性能を一般化して評価することが可能となった。モデルの妥当性を検証するために、様々な水セメント比を設定した供試体を作製し、塩水暴露表面から微小間隔の試料を削取して塩分分布を得るという独自に開発した精緻な分析手法を実施している。その結果、水セメント比の相違による塩化物イオン浸透フロントを概ね良好に再現されていることを明らかにした。今後、高品質材料が有するポテンシャルを十分に活かした構造物の耐久設計を実現するためにも、本研究で提案した材料評価モデルの意義は大きいと認識される。

第3章では、第2章で検討を行った材料数理モデルを用いて、実構造物の耐久性評価を行っている。蒸気養生を施したプレキャストコンクリートで構成されたシールドトンネルセグメントを対象として、塩化物イオンを含む漏水作用が継続した場合の腐食進展過程を追跡評価したものである。対象のコンクリートはおよそ80MPaの強度を有する高品質材料であり、材料を構

成する小径・微細な空隙場の物質移動現象を的確に捉えることが、精度の高い解析結果を得るうえでの必須の条件であるため、本論文2章で提案したモデルが有効に機能する事例の一つであると言える。解析を行うにあたって環境作用の履歴詳細が不明なため、測定された塩化物イオン分布を既知として与え、地下トンネルに作用する漏水の頻度および期間を推定して、今後の腐食ひび割れ発生時期の予測を行っている。その結果、塩分量や構造諸元など多様な要因が影響し、単一の指標のみでは判断が難しい腐食進展リスクを、総合的に評価することが可能であることを示した。また劣化を受けた構造物に対して補修を想定した条件を与えた解析を行うことで、任意の劣化度に対する補修の定量的効果を示している。社会基盤施設の劣化とそれに対する維持補修が喫緊の話題となっている昨今、このような精緻な計算ができることの意義は大きいと認識される。

第4章では、セメント系固化剤あるいはセメント系材料で不溶化された汚染土からの六価クロム溶出問題を取り扱うために、既存のマルチスケール統合解析システムに、新たにクロム移動・平衡・吸着モデルを導入している。モデル化にあたっては、熱分析、XRD リートベルト解析、ICP による溶出イオン測定などによって、セメント水和物中の六価クロム固定量を同定するとともに、改良体中のイオン拡散挙動について粗大空隙構造の影響が適切に考慮されるようモデルの修正を行っている。既往のタンクリーチング試験を用いて検証を行った結果、不溶化した汚染土のクロム濃度、セメント添加量、養生期間、および供試体寸法などの様々な条件に対して、良好に実験結果を再現することを確認している。さらに、提案する熱力学モデルと地球化学計算との連成解析によって地盤の共存イオンや酸化還元雰囲気を考慮するとともに、数kmにわたる地盤中の重金属拡散大規模計算を行うことに成功している。従来の環境影響試験において主流であった材料試験体レベルに代表される小型要素としての挙動と、人間の生活圏や自然環境全体を捉えたスケールで観察される現象を直結したという点で、本手法には大きな学術上の新規性と工学的な有用性が認められる。

第5章では、これまでの章についてまとめるとともに、本研究の中で高度化および構築したモデルの適用限界および可能性・将来性について述べ、さらに信頼性を高めるために今後必要な検討および試験について言及している。

以上のように、マルチスケール場を有する多孔体のイオン遮蔽性能を統一的に取り扱うモデルの構築、および数値プラットフォームの整備に対する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。