

論文の内容の要旨

論文題目 マルチスケール熱力学モデルによる
 セメントー地盤連成系のイオン遮蔽性能評価
 (Multi-Scale Thermodynamic Modeling for Evaluating Ionic
 Transport Resistance in Cement-Soil Composite Materials)

氏 名 高橋 佑弥

コンクリート標準示方書は1990年代よりその設計体系が見直され、2002年までに全ての示方書において性能照査型設計の枠組みが確立された。中でも、2000年に発刊された土木学会コンクリート標準示方書施工編に、耐久性照査の枠組みが世界に先駆けて導入されたことは特筆に値する。その後改訂が進められた現行の示方書では、塩害に関する性能照査について Fick の拡散則に基づく予測手法が示されている。この際、安全余裕を見込んだ簡易評価式を使用していることもあり、場合によって過大なかぶりが設定されうる危険性が指摘されている。不経済な設計を回避するためにも、個々の材料が保有する遮塩性能を過小評価せぬよう、適切に評価し、構造物の設計に生かすことが重要である。しかし、コンクリートの遮塩性能評価にあたって重要なセメント系材料内部の塩化物イオン浸透機構に対する解釈は、現在でも議論が十分に定まっていない。特に、高品質なセメント系材料は近年、特異な液状水の挙動および塩分浸透現象により、特徴的な塩分浸透抵抗性を表すことが示されている。これら緻密なセメント硬化体中の物質移動挙動は、数十 nm 以下の微小な空隙中の現象と密接に関連していると考えられるが、微小域で起こる物質移動現象は未だ明確でないところが多い。高品質材料の性能を活かした設計を行うために、微小空隙中の液状水移動および塩分移動に関する熱力学現象を解き明かすことが不可欠であるといえる。

一方、セメントを取り巻く環境影響の問題に目を移すと、セメント改良体から地盤への有害物質の溶出がある。軟弱地盤のセメント改良や、汚染地盤の不溶化などを行う場合に、周囲の環境汚染を防ぎ、適切に管理することが求められている。セメント改良された地盤から周囲への六価クロム等の溶出挙動を適切に把握するには、セメントの水和反応や水和物へのイオン固定と、地盤材料中の物質移動とを、それらの相互作用を含めて考慮する必要があるが、現時点では、そのような境界領域の挙動を包括的に検討可能な解析方法は提案されていない。

本論文第1章は、以上の背景および既往の研究について整理し、それらを踏まえ、社会基盤を構成する多様な多孔体材料を対象として、熱力学モデルを用いて種々のイオンに対する遮蔽性能を評価するシステムを構築することを目的とした。以下具体内容を示す。まず、微小な空隙に着

目し、塩分・水分物質移動について支配的な物理化学現象の導出とモデルの高度化を行う。構築したモデルは実験結果を用いて妥当性の検証を行い、実構造物の耐久性評価へと適用することを試みる。一方、これまでコンクリートおよびセメント改良土を対象としてきた解析システムの解析対象範囲を地盤材料へと拡充を行う。クロムモデルの新たな構築と併せて、多様な地盤環境を考慮することで、セメント-地盤複合材料からの汚染物質溶出について、的確に予測することを可能とする。

第2章では、数 nm 以下の微小な空隙中の物質輸送モデルを、具体的な物理メカニズムに基づいて高度化し、その妥当性について、室内試験および既往の実験結果を用いて検証した。塩化物イオンの移動モデルに着目しイオンの移動が可能な閾空隙半径を設定し、微小な空隙に付随するインクボトル空隙の量と併せて、イオン移動に寄与する水量を修正した。併せて、液状水の移動モデルについて、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考慮可能とした。解析的検討を行ったところ、液状水移動モデルの高度化により硬化体内部の RH 上昇が抑えられる機構と、塩分モデルの高度化により低 RH での塩分移動が抑制される機構が同時に作用して初めて、低 W/C 領域の高い塩分遮蔽性能が達成されることが明らかとなった。モデルの妥当性について、モルタルの塩水浸せき試験を行い検証した。精緻な試料採取手法を用いる事で水セメント比による細かな塩分浸透性状の違いを実験的に捉えることを可能にするとともに、それら実験で得られた塩分浸透深さの違いを構築したモデルによりの確に再現可能であることを示した。本研究で構築したモデルは高品質材料の適切な性能評価を可能とするものであると考える。

第3章では、2章において塩分浸透に着目し高度化された解析システムを実構造物の耐久性評価へ適用することを試みた。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、塩分含有地下水環境下にある箇所塩害進展期末予測を行った。環境条件として与えるべき漏水履歴を塩分分布から逆推定する必要があったことから、乾湿繰返し条件が塩分分布に与える影響について解析的に検討したところ、乾湿のバランスやサイクル長に応じて様々に塩分浸透深さが異なることが示されたため、その相互関係について整理した。導出された関係を基に、現在の塩分分布測定結果から、過去に作用したであろう漏水履歴を推定し、鋼材腐食解析の結果得られる算出される腐食量を用いて、ひび割れ発生時期の予測を行った。結果、塩分量や構造諸元など多様な要因が影響する腐食進展リスクを本研究の解析手法により定量的に評価が出来ることを示した。また、補修を想定した環境条件を設定することで、補修の定量的効果が示された。

第4章では、これまでコンクリートおよびセメント改良土材料を主対象としてきた解析システムを、改良体および地盤材料中のクロム溶出問題へ適用する為に、新たにクロムモデルを追加するとともに種々の多様な地盤環境への適応を行った。既存のシステムへのクロム質量保存則モデ

ルの追加にあたっては、セメントペーストを用いた固定量測定試験を行い、クロムに固有の水和物固定曲線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空隙構造に基づいて修正を行った。構築したモデルについて、既往のタンクリーチング試験を用いて検証を行い、種々のパラメータのもと良好に実験結果を再現することを確認し、当該問題へ熱力学モデルを適用することの優位性を示した。更に、熱力学モデルと地球化学計算との連成解析により、多様な地盤環境を考慮可能とした。地盤の共存イオンや酸化還元雰囲気を検討により、セメントペースト中の酸化還元環境を明示するとともに、還元雰囲気におけるクロムの状態変化と溶出の抑制を解析的に再現した。構築したセメント-地盤連成材料モデルの数 km の解析サイズの大規模解析への適用を試み、地盤構造の違いが溶出挙動を変化させることを示した。

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、また、さらに信頼性を高めるために必要な検討および試験について言及した。