

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 半井 健一郎

セメント系無機多孔体は、社会基盤施設を構成するコンクリートの主要結合材であるとともに、放射性廃棄物処分施設における人工バリア材やセメント改良土、汚染土壌の固化処理技術、高耐震性土構造物などへと貢献の場を広げつつある。セメント系硬化体の物理化学的特性は構造物の耐久性や安全性を支配するのみならず、地下水を伴う地中環境のもとで活用される場合には、百年を超える長期性能や環境負荷にも関わる。特にセメント改良地盤や環境バリアの長期耐久性能については、対象とする時間スケールが陸上構造物のそれと比較して相当に長い。そのため、過去の経験や実証結果のみで構造寿命の評価を下すには無理があり、長期性能の確保には事前の理論的な劣化に至るシナリオの構築と検証が重要な役割を果たすこととなる。

本研究では、既存のセメント系複合材料の材料品質と構造の統合解析システムを基盤技術とし、セメント硬化体の組織構造形成に関して熱力学連成解析システムの一層の高度化を図ることを目的とする。さらにセメント硬化体からのカルシウム溶脱と、それに伴う材料内部構造の劣化現象を取り入れることで、解析システムの適用範囲の拡張を行うものである。粗大な連結空隙を有する地盤材料まで内部構造モデルを拡張し、中間材料であるセメント改良土および周辺地盤を含めた構造物の耐久性評価を実現可能なものとするを、工学上の眼目とするものである。

第1章は序論であり、コンクリート系社会基盤施設の性能照査設計体系と、それを支える性能評価技術並びに構造挙動の経時変化と周辺気象環境との相互作用に関する技術を概観し、本研究の社会的背景について述べている。そして、本研究の基本フレームを成す熱力学連成解析システムと微細孔内部構造を統計力学的に扱うための多重スケール構造モデルについての研究の動向と現況を考察し、本研究が目指す機能と適用範囲の拡張の方向と開発項目の明確化を行っている。

第2章では、地盤材料を包含する一般化多相物理化学モデルの構築に先立ち、温度に依存するセメント水和生成物の細孔組織構造モデルと熱力学連成解析の高度化を図っている。断熱温度上昇試験から求められる水和反応速度と既往の複合水和発熱モデルとの詳細な比較検討から、ゲル粒子が形成される過程で保有空隙率が温度によって変化すること、及びゲル粒子が析出できる空間寸法が温度によって変化することを示し、その両者を複合して整合性を与えることが数量化モデル構築には不可欠であることを見出している。ゲル粒子保有空隙率と水和析出限界寸法を温度に依存する相互連成モデルによって、断熱・定熱条件の差に関わらず、水和発熱過程と構成微細構造の両者を精度よくシミュレーションすることに成功している。

第3章では、セメント改良土および自然地盤材料への熱力学連成解析システムの拡張を

図るとともに、室内実験による多角的な検証を行ったものである。層間空隙、ゲル空隙、毛細管空隙から構成される既往のマルチスケール内部構造モデルに、新たにマイクロメートル以上の寸法を有する連結粗大空隙相を新たに導入した。新設空隙内の水分平衡とイオン移動経路を新たな機構として追加することで、セメントコンクリートと地盤材料、およびその中間材料であるセメント改良地盤の三者を包括する材料内部微細構造および熱力学平衡・移動モデルに一般化することに成功した。さらに、単独地盤での透水係数の予測、セメント改良砂の断熱温度上昇量、改良地盤空隙内の湿度変化、地盤構成粒子内に貯留する水分との平衡特性を通じて、提案した一般化モデルの適用性を検証している。

第4章では、セメント系多孔体の組織形成とイオン平衡を考慮したカルシウム溶脱連成解析について論じている。地上構造物では問題となることの少ないカルシウムの溶脱も、粗大空隙を多く含むセメント改良地盤が流動地下水下にある場合には、耐久性の検討を要する場合も想定される。ここでは、カルシウムの溶出に伴う組織構造の変化、ポラン反応による水酸化カルシウムの消費、塩化物イオンの侵入に関連する溶解度の変化を統一的に扱うことを念頭において、固体中に存在する全カルシウムを対象とする固液平衡モデルに立脚した平衡移動に関する支配方程式を与えている。前節で構築したマルチスケール材料内部構造モデルと連立することで、任意の構造形状と境界条件に対するイオン溶脱・再沈殿過程の解析を可能とした。セメント改良土とコンクリートを用いた促進浸漬試験、および地中構造物の長期劣化事例による検証を行い、地盤-構造-地下水系でのカルシウムイオン溶出過程の感度解析から、地盤改良システムの総合的な耐久性能の検討を行った。

第5章では結論であり、知見の適用範囲と今後の展開方向について概括している。

本研究の主たる対象はセメント改良地盤およびコンクリート構造の長期耐久性であるが、同時にセメント系多孔体を主たる構成要素とする無機複合材料の内部構造、水分平衡、イオン移動の一般化支配方程式を与え、建設材料と構造の熱物理化学的知見の体系化を図った視座に、本研究の大きな特徴がある。よって、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。