

審査の結果の要旨

氏名 木ノ村 幸士

原子力発電所や原子燃料サイクル施設において発生する放射能レベルの比較的高い廃棄物を対象として、一般的な地下利用に対して十分余裕を持った深度（地下 70m 以深）に埋設する処分方法（中深度処分）の具体的な計画が始められている。今後、原子力施設の廃止措置が進むことを鑑みると、中深度処分施設の安全性を技術的に確立しておくことが喫緊の課題となっている。これらの背景を踏まえ、本研究は、中深度処分施設のセメント系人工バリア材料を主たる対象として、収容する放射性核種の崩壊熱の影響を受け、廃棄体埋設完了後、数十年にわたり 60℃ 程度の高温環境に曝される場合の材料特性の変化を評価する手法について検討したものである。また、中深度処分施設のセメント系人工バリアにはフライアッシュ（以下「FA」）混合セメントの適用が一つの候補として考えられるが、その反応プロセスについては未解明な部分が多い。超長期の評価が要求されるため、環境条件の変化を考慮しつつ、時系列で材料特性を予測することが可能な数値解析手法を整備しておく必要がある。そこで、任意の材料、配合、養生条件に対してセメント系硬化体の固体形成過程や長期にわたる変性現象の定量評価を行うために、長期高温環境に曝される環境下での既存モデルの適用範囲の拡大・高度化を図ること、さらに FA 混合セメントについて解析精度の向上を図ることを研究の目的としている。

第 1 章では、本研究の背景や目的を示し、50～100℃ 程度の高温環境下でのセメント硬化体の特性変化に着目した既往の研究のレビューと、本研究の基盤となる熱力学連成解析システムおよび構成モデルについて概説している。

第 2 章では、継続的に高温作用を受ける環境下において人工バリアの性能維持および向上を実現するために、人工軽量細骨材（以下、「ALS」）の混合による内部養生効果を確認する基礎的な検討を行っている。その結果、①材齢 91 日以降に高温を負荷した場合、低水結合材比を設定した配合では ALS の有無に関わらず、空隙構造が顕著に緻密化し圧縮強度が増加すること、②低水結合材比の場合は ALS の有無に関わらず材齢経過後に高温高湿環境におくことで、塩化物イオンの実効および見掛けの拡散係数が 20℃ 封緘養生継続時より低減すること、③低水結合材比

配合であっても ALS を含む場合には，20℃封緘養生継続では粗な空隙構造が長期材齢でも残存し，物質移動抵抗性の低下を補うほどの内部養生効果が期待できないことを明らかにしている。②については，既往研究の成果等だけでは説明が出来ないことから，その要因やメカニズムについて第3章でより深く検討している。

第3章では，高温環境下における緻密化メカニズムが有効に発揮するための条件を精緻に検証するため，FA混合の有無に着目した比較実験を行っている。その結果，①普通ポルトランドセメントの一部をFAで内割置換したFA混合モルタル（以下「FAC」）および同セメント単味のモルタル（以下「OPC」）は，60℃環境への曝露開始材齢に関わらず，曝露後に強度が増加する傾向があること，②20℃封緘養生終了時の圧縮強度に対する60℃曝露後の各材齢での強度比は，OPCでは材齢経過とともに概ね増加するが，FACでは高温負荷直後に大きく増加する一方で，その後は低下する傾向があること，③FACでは高温負荷継続に伴い100nm以下の連続空隙が増加しており，外部環境への水分逸散によりC-S-Hの構造が変化した可能性と，高温により析出するC-S-Hの相組成が変化した可能性などが推察されること，④OPCでは60℃環境で水分が逸散しやすい条件ほど，塩化物イオンがより深くまで浸透し見掛けの拡散係数が増加する傾向があるが，FACでは20℃封緘環境と60℃環境で違いは見られないこと等を明らかにしている。

第4章では，高温環境下における低水結合材比FA混合モルタルの挙動を高精度に予測可能なモデル構築を目指し，既往の複合水和発熱モデルを用いて，各種セメントクリンカーの水和率やFA反応率の予測精度について検証を行っている。その結果，①各種セメントクリンカーの基準発熱速度，温度活性等の見直しにより，断熱温度上昇量の解析精度を損なうことなく，各種鉱物の水和率の解析精度の向上を達成したこと，②内部生成層中のイオンの移動抵抗性の違いに着目したFAの水和反応に関する高度化モデルを提案し，FA反応率の解析精度の大幅な向上を達成したこと等の主要な成果を得ている。

第5章では，前章で高度化した複合水和発熱モデルと，既往の空隙構造形成モデルおよび水分平衡・移動モデルの連成解析を実施してモデルの精度検証を行い，以下の点を明らかにしている。①既往モデルを用いた解析では，低水セメント比配合において，常温環境における長期的な水和進展が過大であること，および長期常温養生後に高温を負荷した場合の水和進行が過大である点についてモデルの改良が必要であること，②モデル改良として，凝縮水の空間的偏在を考慮した自由水低減係数を新たに提案・導入し解析精度の大幅な向上を達成したこと，③FA混合セメントを対象にC-S-Hゲルのかさ体積の変化を考慮した圧縮強度発現モデルを提案し，さらに上記の自由水低減係数を考慮することで良好

な解析精度を達成したこと，など主要な成果を得ている。

第 6 章では，前章までに高度化した熱力学連成解析システムと，既往の時間依存複合構成則を連成させ，時間依存力学応答の観点から解析精度の確認を行った。その結果，特に低水セメント比配合に対して，常温での長期収縮挙動や高温でのクリープ・収縮挙動の予測精度が向上することを明らかにしている。

最後に，第 7 章では，本研究の結論を示している。

本論文は，以上の成果に対して学術的な価値と工学的な有用性が認められるため，博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。