

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 ルアン ヤオ

LUAN YAO

栞 尧

高炉で鉄鉱石を溶融・還元する際に発生する高炉スラグは、急冷・微粉砕することでコンクリートの混和材として古くから有効活用されてきた。最近では、セメントの製造過程で大量に排出する CO<sub>2</sub> を削減するため、またアルカリシリカ反応や塩化物イオンの浸透抑制に対して効果的であるためなどから、高炉セメントの利用が一層進みつつある。一方で、製造技術の進歩により普通セメントと遜色ない初期強度を発揮するに至った近年の高炉セメントは、自己収縮や乾燥収縮に起因する初期ひび割れの発生が多いことも報告されている。性能照査型設計の枠組みのもと、高炉セメントのポテンシャルを十分に生かしながら環境負荷低減と高耐久性・高機能性を実現するためにも、また構造物の収縮ひび割れ抑制を狙った材料設計やセメント製造プロセスにフィードバックするためにも、高炉セメントの若材齢固体形成に関わる材料モデルと一般化解析手法の構築が強く望まれる状況にある。本博士論文は、高炉スラグ微粉末の水和反応および生成される水和物のキャラクター（かさ密度ならびに固体比表面積）に着目し、普通セメントの系で展開される材料熱物理特性との相違を抽出しながら既存の熱力学連成モデルに修正を施すことで、高炉セメントの若材齢固体形成を追跡する一般化数値解析モデルの提案に成功したものである。主たる成果は以下に列挙される。

第一の成果として、複合水和発熱モデルを改良し、高炉セメントの水和進展に関する予測精度が格段に向上した点が挙げられる。近年、XRD リートベルト解析や選択溶解法、また SEM 観察などの各種分析技術の向上がみられ、高炉スラグ微粉末の水和進行に関する精度の高い定量データが得られるようになってきた。本研究ではそれらの実験事実に基づき微視的機構に関する仮説を構築し、水和反応に支配的な要因を既存モデルに組み入れることで、高炉スラグ微粉末と母材セメントの水和進展を高精度に予測することに成功した。高炉セメントの反応により形成される C-S-H 水和物のカルシウムシリケート比の低下に着目し、内部水和生成物層のイオン拡散抵抗性の増大を考慮に入れることで、任意の高炉スラグ置換率に対する水和率、水酸化カルシウム残存量、および断熱温度上昇量を統一的に追跡することが可能となったものである。近年の詳細分析により得られつつある微視的メカニズムを直接モデルに取り込み、マクロに現れる材料物性を予測する一般性に本研究の価値が認められる。

第二の成果は、高炉セメントの系における空隙率算定モデルを改良し、その結果として強度発現予測モデルの高精度化を達成した点である。既往の研究では、ゲルスペース比に着目した強度モデルが提案され、普通ポルトランドセメントおよびシリカヒュームを用いたコンクリー

トの強度発現が精度良く予測されるに至っている。しかしながら本研究において、高炉セメントに対して既存強度モデルを適用したところ、実験事実としてよく知られる高炉セメントコンクリート特有の長期強度の増進が再現されないことが明らかとなった。そこで既往の研究報告に基づき、C-S-H に内包される空隙率（C-S-H のかさ密度）を高炉スラグ微粉末の水和に応じて変化させるモデルを組み込み、任意の置換率および水結合材比に対して強度発現プロセスを追跡することが可能となった。

第三の成果は、高炉セメントの空隙構造分布に立脚して、細孔内の水分保持能力、乾燥環境下での水分逸散挙動、および乾燥収縮挙動について精度向上を達成した点である。高炉セメントの水和進展に応じて、カルシウムシリケート比の変化による C-S-H ゲルの小寸法化およびゲル比表面積の増大を与えるモデルを組み入れた結果、特徴的な空隙構造分布の再現と、それに基づく水分保持・逸散挙動の予測精度向上に成功した。乾燥収縮については、解析モデルと実測値の間で一部乖離が見られるものの、今後、精度の高い長期試験を行いながらモデルの微修正を加えることで、初期ひび割れ照査を支援する予測技術が実現されるものと認識される。

以上のように、本研究では、高炉スラグ微粉末とポルトランドセメントを任意に混合した系における水和反応および空隙構造形成過程を精度よく追跡するモデルを提案するとともに、それにより求められる強度ならびに水分逸散・乾燥収縮に関する汎用性の高い解析手法を示した。本研究の成果は、高炉セメントに関する知見の体系化に寄与するとともに、材料・構造設計ならびに性能照査技術の高度化に貢献しうるものと判断される。以上から、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。