

審査の結果の要旨

氏名 ペン コルニアット

温度変化、ならびに水和反応や水分逸散に伴う空隙内部の湿度低下によって発生するコンクリートの収縮は、ひび割れを発生させ、コンクリート構造物の美観や耐久性を損なう要因となる。構造物に発生するひび割れを低減・制御するために、膨張材が古くから利用されてきた。しかしながら、膨張材を構成するアウイン、無水石膏、フリーライムの化学反応を、精度良く扱う一般化モデルが存在しないこと、また膨張材の反応によってもたらされる力学挙動を記述する構成則が十分に整備されていないことから、現場の適用条件に合わせた配合の事前検討や、膨張材添加量の微調整等を余儀なくされてきた。本研究は、これらの背景を踏まえ、水和反応と空隙構造形成に立脚したマルチスケール型膨張コンクリートモデルの開発と実験による検証を行うことを目的としている。

第1章では、研究の背景と目的および論文の構成について述べている。

第2章では、膨張材および膨張コンクリートの既往研究について概要をまとめている。膨張材の反応メカニズムと膨張発生の機構、膨張材を取り扱う数理モデル、および膨張材によるケミカルプレストレスを扱う膨張エネルギーの概念について、主要な過去の研究内容を概説している。

第3章では、本研究の基盤となる、マルチスケール統合解析モデルの概要を示している。セメントの水和反応を取り扱う複合水和発熱モデル、ナノからマイクロメートルスケールに分布するセメント硬化体の微細組織構造を記述する細孔構造形成モデル、微細構造内の水蒸気および液状水の二相平衡と移動を扱う水分移動平衡モデル、コンクリートの時間依存挙動を取り扱うマルチスケール・ソリディフィケーションモデルの概説を行っている。さらに、ひび割れ以後の力学応答を司る鉄筋コンクリートの構成則についても概要をまとめている。

第4章では、膨張材の反応モデルを構築する際に必要となる、フリーライム、アウイン、無水石膏の反応プロセスを実験的に定量するため、構成成分の異なる3種類の膨張材を用いて、膨張材単体とセメントと膨張材を混和した系において、XRD リートベルト解析および熱重量分析を実施している。

第5章では、既存のマルチスケール解析システムを拡張し、膨張コンクリートを取り扱うために必要なモデルの開発と実装を行っている。まず、複合水和発熱モデルに対して、新たにフリーライム、アウイン、無

水石膏の反応を記述する水和発熱速度項を導入した。実験から同定した基準水和発熱速度と水和生成物の水分消費を加味した自由水の低減係数などを新たにモデルに導入することによって、第4章で定量した膨張材の反応を妥当に捉えるモデルの構築に成功している。

次に、膨張材の反応を空隙構造形成モデルで考慮するために、膨張材由来のエトリンガイトおよびポルトランドイトの体積を陽な形で計算してモデルに加味するとともに、結合材の平均粒子間距離と外部生成物の水和殻厚さのパラメータを利用して、水和物生成が膨張に寄与するステージを算定している。そのうえで、等方性を仮定した局所的な膨張圧を飽和指数の関数として定式化し、既存の時間依存構成則に重ね合わせ、膨張コンクリートの長さ変化について予測を試みた。0.97%の鉄筋比で一軸拘束された膨張コンクリートの長さ変化については、異なる母材(普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、および高炉セメント)および異なる膨張材量(0%~11%)を使用した供試体に対して挙動を適切に捉えられていることを示している。一方で、0.28%~2.8%と拘束鉄筋比を変えた条件に対しては、拘束によって相違する膨張ひずみが捉えられないことを明らかにした。

第6章では、鉄筋拘束の影響を加味するために、膨張コンクリートの力学異方性を導入することが不可欠であるとの考察から、ポロメカニクスに基づく膨張コンクリートモデルの構築に取り組んでいる。アルカリシリカ反応(ASR)による膨張挙動とひび割れ損傷発生とのアナロジーに基づき、ASRを取り扱う既往モデルを膨張コンクリートに応用展開するものである。拘束方向と非拘束方向の膨張異方性を考慮するパラメータを、拘束鉄筋比の関数として簡便に与えることで、現実の挙動に近い解析結果が得られることを示している。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果についてまとめている。

以上のように、膨張材の水和反応と空隙構造形成に立脚したマルチスケール型膨張コンクリートモデルの開発を新たに行い、微視的な化学反応から巨視的な力学応答までを一気通貫で取り扱う手法を提案した点に、学術的および工学的観点の両者から研究の意義が認められる。

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。