

審査の結果の要旨

氏名 米田大樹

コンクリートの乾燥収縮ひび割れは、構造物の耐久性や美観を損なう問題として、定量的に予測する試みが数多く行われてきた。乾燥収縮ひび割れに影響を及ぼす収縮やクリープ、強度、弾性係数といった個々の材料特性についても、材料の微視的機構に関する考察や、メカニズムに立脚したモデルの構築・検証が進められている。しかしながら乾燥を受けたコンクリート部材のひび割れ進展や、引張強度・弾性係数の変化、さらに持続荷重下でのたわみ進行や終局耐力への影響などを一般化して予測する手法は未だ構築されていない。ある条件下の挙動が予測可能であっても、配合や使用材料が変化した場合、部材寸法が変化した場合、外部環境が変化した場合など、様々な初期条件・境界条件に対して適用可能な統一的手法が確立されていないのが現状である。これは、収縮、クリープ、およびひび割れ発生・進展等の現象が、各々を分離・独立して定量化することが原理的に不可能であり、各々の組み合わせで全体の挙動を記述する手法に限界があることに起因する。このような背景のもと、本論文は、既存のマルチスケール統合解析システムを基盤として、ナノ～マイクロメートルの微視的機構に基づく熱力学モデルと、要素内に複数のひび割れを含む巨視的モデルをつなぐメゾスケールの現象に着目し、任意の配合、使用材料、環境条件下におけるコンクリート材料の力学・熱力学特性から構造応答までを、統一的に評価する手法の構築に取り組んだものである。

第1章は序論であり、本論文の背景と目的について述べると共に、既往の研究について整理を行っている。乾燥収縮とそれによって発生するひび割れは、セメント硬化体内部ならびにセメント硬化体と骨材界面に発生する微細き裂から、コンクリートの巨視的なひび割れまでを包含して議論する必要があること、更にモデルを構築するにあたっては、対象となる現象の寸法（コントロールボリューム）を明確に認識する必要があることを述べている。

第2章では、本論文の基盤解析技術であるマルチスケール統合解析システムの概要を述べ、第3章以降のモデルの検証と修正に必要な情報について整理を行っている。

第3章では、乾燥条件下での一軸引張強度および弾性係数、乾燥収縮

ひずみに着目し，断面の小さな部材で表面近傍に大きな湿度勾配が生じる場合には，既往の分散ひび割れモデルを用いた解析では引張強度，弾性係数，乾燥収縮を過少評価することを明らかにした．解析結果が乖離する理由として，表面近傍のコンクリート内部に発生する微細き裂に着目し，コンクリートの破壊（軟化）に至る巨視的なひび割れと区別して取り扱うモデルを提案した．微細き裂の発生によって，セメント硬化体内部の毛細管張力や分離圧に起因する収縮駆動力の寄与が，巨視的なコンクリートの収縮に対して減少すると仮定し，空隙内部の湿度勾配をパラメータとした収縮駆動力の見掛け上の低減をモデル化したものである．また乾燥によって強度が増加するという既往研究の知見に立脚して，不飽和空隙内の収縮駆動力がプレストレスとして作用するとの仮説を立て，任意の乾燥環境下の材料力学特性をモデル化した．更に微細損傷と水分逸散の関係を陽な形で考慮するため，ひび割れ発生後の有効ひずみをパラメータとして水分流束の増加を簡易にモデル化した．以上の提案モデルを組み合わせることで，異なる配合，異なる材齢・乾燥開始材齢に対して，引張強度の変化と水分逸散量が妥当に再現されることを示した．

第4章では，骨材収縮の影響が顕著となる場合について更なる検討を行っている．骨材自体の収縮量が大きくなる場合には，第3章で提案したモデルのみでは乾燥下での部材の挙動を適切に表現出来ないことを明らかにした．体系的な解析的検討を通じて，骨材収縮が大きい場合には乾燥条件における表面近傍のひび割れ発生を過剰に評価することを見出している．そこから骨材収縮がセメント硬化体と骨材界面の剥離や微細き裂の発生をもたらす可能性を指摘し，湿度勾配に応じて見掛け上の骨材収縮量を低減させるモデルを提案した．更に骨材とセメント硬化体の収縮差によって各々に発生する主応力が変化するが，コンクリートとして簡易的に取り扱うために，骨材収縮によって見掛けの引張強度を変化させる手法を提案している．骨材量・骨材剛性，骨材収縮量，およびセメント硬化体の剛性の相互作用によって様々に変化する応力状態を，第一次近似としてコンクリートの見掛けの引張強度により表現するものである．以上のモデルを適用することによって，既存の時間依存構成モデルを大きく変更することなく，任意の骨材収縮量に対して，乾燥下での引張強度の変化や収縮ひずみの増大，また拘束下での乾燥収縮ひび割れを適切に再現することに成功している．

第5章では，提案モデルをRC梁部材に適用して，乾燥条件下での挙動について検証を行った．段階的に増加させた持続荷重を作用させ，温湿度が変動する環境下で支間中央のたわみについて実験，解析を比較した結果，時間と共に増大するたわみ量が良好に予測されることを示した．さらに封緘養生と乾燥養生を行った梁部材のせん断破壊実験を取り上げ，乾燥により低下する初期剛性や，各々の条件下での終局耐力が適切に評

価されることを示している。

第 6 章では、実構造物を対象としたひび割れ進展解析を行っている。山口県が運用を行っているひび割れ抑制システムの中で、一般に公開されている打設管理記録、温度計測データ、ひび割れ観察記録などのデータベースを活用して、本提案手法の検証を実施した。実構造物で計測されている温度履歴や、リフト毎のひび割れ発生状況を良好に再現すると共に、使用材料や施工プロセスを仮想的に変化させたシミュレーションも行っている。

第 7 章では本論文で得られた成果を章ごとにまとめ、今後の課題や研究の展望についても記述している。

以上のように、本研究はセメントの水和反応、水分移動および空隙構造の形成といったミクروسケールの現象、乾燥収縮による微細き裂の発生から乾燥収縮ひび割れ発生に至るメゾスケールの現象、ならびに分散ひび割れモデルにより記述される巨視的な構造応答を統一的に結びつける手法の構築を試みたものである。乾燥を受ける部材の挙動を一般化して扱う手法を提案した点に、高い学術的な価値と工学的な有用性が認められる。

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。