

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 浅本 晋吾

収縮・クリープに代表されるコンクリートの時間依存変形は、常温・常時作用応力下であっても弾性ひずみを超える程の変形を呈するという点で特徴的な挙動であり、長期の耐久性、使用性、および安全性を考慮する上で精度の高い予測値が必要とされる。一方で、セメント硬化体の細孔構造および細孔内水分状態に大きく依存する現象であることが、既往の研究によって明らかにされている。従って、材齢、水セメント比、雰囲気相対湿度、単位水分量などに基づいた様々な収縮・クリープの予測式が提案されているが、室内実験に基づいた経験モデルに留まっているものが多く、任意の配合、環境条件に対応できる予測モデルは少ない。配合、使用材料、ならびに養生条件などによって異なる時間依存変形を、微視的な機構に基づき、定量的に一般表記することはこれまで困難と考えられてきたのである。

近年、既往の研究から得られた現象・機構に対する理解、および数値解析技術の進展に伴い、セメント系複合材料の微細材料モデルと、巨視的な応力—変形を与える構造モデルを直結するマルチスケール型連成解析システムが提案されている。材料熱力学に基づく微視的な視点と構造工学的な巨視的視点を融合・連成させ、時空間にわたって挙動を予見しうる解析システムの構築を目的としており、本研究の基盤技術として位置づけられる。本解析システムで核となるのが、コンクリート材料の硬化から劣化までを追跡する熱力学連成解析システム *DuCOM* と、任意の外力下での構造応答、損傷を追跡する非線形有限要素構造解析システム *COM3* である。*DuCOM* から出力される水和・水分分布・細孔構造などの熱力学状態量に立脚した複合材料としての物性、ならびに内的・外的要因からもたらされる体積変化駆動力を構造力学解析システムに組み入れることで、巨視的な時間依存変形を得ることが可能となっている。すなわち近年の先行研究によって、統合解析システムの基盤プラットフォームは確立されており、常温恒湿環境において一定精度の時間依存変形の予測可能であることが、これまでに示されている。それに対して本研究では、種々の熱力学履歴・荷重履歴下での収縮・クリープ挙動に着目し、既存の材料構成モデルの高度化と適用性の拡大を図るとともに、実際の構造物への適用を試みることを目的としている。

セメント系複合材料の収縮・クリープ現象は、数十年以上という時間スケールに渡って持続的に発生する特徴的な物性であり、実験室ならびに実環境下における多くの構造挙動からもその特性は明示されている。本研究では、3年を超える実験結果との比較を通じ、既存モデルは収縮・クリープの収束が実際より早いことが確認されたため、ナノからマイクロメートルの寸法を有する微細空隙に存在する水分滲出に起因する力学モデルの再検討を行っている。既存モデルでは、粘塑性挙動をもたらす構成要素として、数ナノから数十ナノメートルの寸法を有するゲル空隙を仮定していたが、本研究では新たに存在形態によりゲル粒子間とゲル粒子内部の空隙の二種類に再定義し、異なる力学特性を与えてい

る。提案モデルによって、常温・高温ともに収縮・クリープの長期予測は大きく改善され、その妥当性を検証することに成功している。また、既存の粘塑性モデルでは、過去の応力履歴とは独立して変形が進行するモデルを採用していた。しかしながら、実際には持続応力が大きく低下すると、その後のクリープの進行は小さいことが報告されており、過去の応力履歴の影響を考慮する必要がある。そこで、応力履歴の影響を反映させるため塑性仕事の概念を導入し、粘塑性速度に経路依存性をもたせることでモデルの改良を図っている。その結果、応力履歴に依存する実験の傾向が再現され、変動する作用外力下の時間依存変形についても改善することに成功している。以上のモデルに関する改良は、本論文3章に述べられている。

マルチスケール複合構成モデルの特色のひとつは、毛細管張力や表面エネルギーに起因する内部応力と外部からの外部応力を連成させることで、収縮・クリープ項を分離することなく、境界条件に応じた構造応答として変形を予測できることにある。これら数理モデルの検証として、毛細管張力によるセメント硬化体中の内在収縮応力が、材料の体積変化に与える影響について実験的に検討している(第4章)。乾燥後、即座に封緘を施し毛細管張力の増加を意図的に停止させ、一定内在応力下での時間依存変形挙動を観察した。結果、内在応力による持続変形は封緘前の乾燥履歴の影響を強く受け、封緘によって内部の水分が乾燥した表面に移動し平衡状態に至ると、水分移動経路に由来する相対湿度上昇によって変形の進行が阻害される傾向が見られた。短い乾燥期間(1日)の後封緘を施すと、封緘後の収縮回復は小さくその後大きく収縮が進行した。これによって、現在の研究アプローチの妥当性が検証され、収縮はクリープ現象の一種であることが示されたのである。さらに同様の実験を高温環境下で行い、温度の違いが体積変化にもたらす影響について検討を行った。高温環境下で封緘を施すと、収縮が大きく回復するという常温とは全く異なる挙動を呈した。これは近年報告された高温環境下でインクボトル中の水分の逸散に起因するものと考えられ、これらの水分が逸散、再分配されることで封緘時の平均内部相対湿度が上昇し、著しく収縮が回復したと推察した。高温における特異な水分挙動を巨視的な体積変化の観点から検証することができたのである。

最後に第5章では、提案システムをPRC道路橋に適用して、実際に発生した初期ひび割れに関する検討を行っている。ひび割れにつながった各種要因について、解析的な観点から定量的検討を行ったものである。建設時の季節、コンクリートの配合、ならびに過剰な鉄筋配置が多大なひび割れをもたらす要因として挙げられ、検査報告と適合する妥当なシミュレーション結果が得られた。実構造物のひび割れ照査に本解析システムが有効に適用できることを示したのである。

以上のように、本研究では既存のコンクリート複合構成モデルの高度化・検証を図ると共に、実際の構造物への適用を行うことで、手法の精度向上・適用範囲の拡大に成功している。工学的な貢献は大きいと認識され、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。