

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 朱 銀邦

社会基盤施設の主要材料の一つである無機複合多孔材料は、常時の荷重・環境条件で発生する弾性変形の数倍にも及ぶ時間依存変形を僅か数年で呈する。そのため、設計段階で時間依存性を部材・構造レベルで予測して、適切な対策を事前に講ずることが肝要である。これまで、クリープに代表される時間依存変形特性は、温度応力と温度ひび割れリスクの評価、有効プレストレスの算定とその現場管理、部材の長期撓みの予測に不可欠なものとして位置づけられてきた。今日では、都市基盤の維持管理の合理的な策定と公的資金の戦略的な活用にあたって、現存する施設の残存性能や長期にわたる変形と損傷リスクの事前の算定が、ライフサイクルコストの評価等に益々必要となってきた。

一方、コンクリートなどの複合多孔体のクリープや乾燥収縮といった時間依存性は、ナノ～マイクロスケールの空隙構造に捕捉される水分と極めて関連が高いことが知られており、細孔内の水分の熱力学的状態量を巨視的な時間依存変形と結びつけることが、過去 10 年にわたって試みられてきた。これまで常温下の短期～中期時間依存性（月オーダー）には一定の成果を挙げってきたが、年オーダーの長期と高温時さらに極低湿度環境下では、変形機構の定性的分析には一定の進展を挙げつつも、数量化モデルへのステップには、個々の細孔構造内の水分状態と固体変形のモデルの深化が急務となった。本研究は微細空隙内の水分モデル高度化の要請を受け、巨視的な材料時間依存性を CSH 結晶層間空隙、ゲル粒子空隙、毛細管空隙内の水分状態とセメント硬化体自体の変形とを連動させる、マルチスケール構造材料モデルを提示することを目的とした。

第 1 章は序論であり、クリープ変形、乾燥収縮、自己収縮変形の発現機構に関する研究と、設計施工実務において従来から適用されてきた工学クリープモデルに関する研究の両者を整理し、微視的空間に捕捉される水分と巨視的な変形との関係が直接的に関連づけられていない現状を説明している。また、本研究の基盤を形成する細孔内水分の状態と移動に関わるモデルに言及し、既往の研究の有機的な結合が当該問題の一般化に不可欠であることを論じている。

第 2 章では、細孔内水分の熱力学的状態量を算定するマルチスケール材料モデルの詳細をまとめたものである。巨視的な無機複合多孔体の変形に寄与すると考えられる水分の平衡条件を厳格に各寸法の細孔空間で規定・検証すると共に、構造力学体系との連成解析の概要について論じている。

第 3 章は微細空隙構造と内部水分状態に立脚したコンクリート構成則を提示したものであり、本研究の中核をなす。砂利・砂の弾性体分散相と、それを包み込むセメントペースト媒体相の二相に複合体を単純化し、平均体積成分と平均偏差成分に現れる骨材固体粒子とセメント硬化体相の相互作用の数理モデルを提案している。砂利・砂の分散相は 10^{-3} - 10^{-2} m の

寸法を有しており、構造解析に用いる基準体積にほぼ相当する。

媒体相は、さらに 10^{-9} - 10^{-6} m の寸法を有するゲル空隙および毛細管空隙から構成される多孔体の集合としてモデル化されている。本研究では、セメント硬化体の変形に強く関与する、ゲル空隙と毛細管空隙内に捕捉される水分(凝縮水,水蒸気,吸着水)の熱力学的平衡条件を規定する状態方程式を定め、含水率・平衡水蒸気圧・湿度・凝縮水圧力降下・吸着水層厚・凝縮水粘性の活性化エネルギー・温度を、硬化体変形の構成則で連成させる熱力学的指標とした。これを用いて短期および長期クリープ変形モデルを提案している。ここで、自己変形をもたらす内部作用機構として、凝縮水の表面張力と固体表面での分子間力を考慮している。外力、内力の機構に関わらず、水和によって生成される単位セメント硬化体層(クラスター)の力学特性を同一と仮定し、生成時間の異なるクラスター毎にそれぞれの初期ひずみと履歴依存性を代表する塑性パラメータを与えている。これにより、絶乾状態から完全湿潤状態までの自己収縮と乾燥収縮(自己変形)を統一的に表現することに成功している。

CSH トベルモライト板状結晶に挟まれる約 3 Å の層間空隙にある水分子は、一般の自然環境下では失われることは殆ど無く、極めて乾燥度の強い環境で影響を受ける。この水分は水蒸気との平衡状態に直接的に連動する成分と、遅れ変形(水分子の回転)に寄与する成分が存在すると考えられる。後者はゲル空隙モデルの温度依存型の粘塑性モデルに取り込み、前者は相関空隙内の水分移動と連結させた塑性変形成分を仮定することで、全体変形を記述するモデルを取り入れている。

第 4 章では、様々な環境におかれたセメント系複合材料の短期,中期および長期変形の実験結果との比較検証を行っている。検証に用いた水セメント比は 30%から 60%以上の範囲を網羅している。環境温度は 20 度~70 度を対象とし、使用状態の構造解析へ適用されることを鑑み、応力レベルはおよそ圧縮強度の 40%以下を主に対象とした。ここでは巨視的なひび割れを許容しない範囲としている。応力保持期間は数時間から 2-3 年のオーダーである。自己乾燥変形、乾燥収縮変形、基本クリープならびに乾燥クリープ変形を、それぞれの環境条件に対してマルチスケールシュミレーションを実施して、実験結果との比較検討を行っている。温度応力制御ならびに中期構造変形解析に耐え得る適用範囲と工学精度を有していることを確認した。

第 5 章では結論であり、知見の適用範囲と今後の展開方向について概括している。

本研究は、コンクリートの応力ひずみ関係に現れる時間依存性のうち、微細空隙内の水分の平衡と移動に連動した中長期変形特性を予測する多段階型数値材料モデルを提示した。ここで、任意の自然環境条件に対応可能な一般性が付与され、社会基盤施設の中長期変形と損傷評価法を提示した。今日、マスコンクリートの温度応力制御ならびに鋼材腐食に伴う損傷劣化を内在する部材の中長期性能照査に適用されており、今後の都市再生と継続的な維持管理に貢献することが期待される。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。