

され得るため、巨視的な応力－時間－変形関係を微視的機構モデルに立脚して、定量的に一般表記することは、これまで困難であった。

従来、時間依存変形に対しては、自己・乾燥収縮、基本・乾燥クリープに分離・独立して定量化し、各々の組み合わせで全体の挙動を記述する手法が取られてきた。実務設計上、このようなアプローチは高い利便性を有するが、現象論的な側面から見れば、異なる境界条件のもとでの一変形挙動を代表しているにすぎない。すなわち、各々の重ね合わせ則の妥当性は全ての場合に担保される訳ではなく、ある境界条件下での挙動を便宜的に抽出したものであると言える。

以上の背景から、本研究は、コンクリート材料を支配する物質・エネルギーの生成・移動に関わる熱力学連成システム *DuCOM* と構造力学挙動を支配する変形・応力場に関わる構造解析システム *COM3* との連成により、内部状態量としての水分・水和・細孔構造に立脚して、巨視的に観察される時間依存変形を記述するコンクリートの一般化構成則を構築することを目的とした。短期間から長期間にわたるコンクリート構造物の性能、またはその挙動を予測するシステムを提案することを、念頭においた研究でもある。つまり、概ね $10^{-7}\text{m}\sim 10^{-4}\text{m}$ の細孔中の凝縮水に適用されると考えられる毛細管張力理論や滲出理論、水分子と同オーダー ($10^{-10}\text{m}\sim 10^{-9}\text{m}$) の細孔空隙に関与する分離圧力理論などの知見を、それぞれ固有の空隙寸法に適用し、これらを積分することで巨視的な材料構成則の導出を試みるものである。

本研究の眼目は、細孔内水分の熱力学状態量（温度、セメント水和度、空隙径分布、空隙内飽和度、湿度、吸着分子層厚）に基づいて変形特性が規定される一般性に求められる。細孔内の水分分布を基に、セメント硬化体を構成するゲル粒子自体の変形と、ゲル粒子から構成される毛細管構造の変形特性を個別にモデル化し、同時に毛細管張力と吸着水離脱によるゲル粒子の固体表面エネルギーの変化を、変形の潜在駆動力として定量化することで、一般化構成則を導く方法論を提案する。ここで状態諸量の算出には、物質・エネルギーの生成移動に関する連成解析システム *DuCOM* を採用した。さらに、コンクリートを骨材とセメント硬化体の2相に代表させ、配合因子を構成モデルに陽な形で取り入れるようにした。

微視的機構と巨視的な変形特性を関連づける以上のスキームに、水和過程の過渡応答モデルを組み入れる必要がある。本研究で *Solidification* 理論の考え方を導入した。水和の進行に伴うセメント硬化体の形成は、既に形成を終えた固体の周辺に付加される殻（クラスター）の集合として表現するものである。同じ殻の力学特性を仮定するが、生成時の状態諸量が個々の殻で異なることを履歴変数に記憶させることで、一見して複雑な履歴性状を合理的に

数量化する方法を採用している。なお、高応力域の微細ひび割れ進展に起因する時間依存性は、本研究の対象外とした。

提案手法の適合性を総合的に検証するために、異なる配合と環境条件に対して、時間－応力－ひずみの組み合わせを多角的に変えた実験と解析結果との比較検討を行った。本手法によれば、例えば乾燥収縮変形は応力ゼロ、試験体表面で一定湿度条件の下に算出される特解に相当する。乾燥クリープはさらに応力固定の境界条件下での特解に相当する。ひずみを収縮やクリープ項等に分離する必要は無く、試験体の寸法に依存する変形は、水分の移動解析との連成を通じて構造特性として計算されるのである。検討の結果、コンクリートの各現象、自己収縮、乾燥収縮、基本クリープ、乾燥クリープ、及び種々の温度下におけるクリープ挙動を適切に追跡することに成功した。乾燥条件下においては、提案した収縮駆動モデルとコンクリートの材料モデルの連成により、コンクリートの収縮による変形が良好な精度で予測された。自己収縮の場合、主たる変形駆動力は毛細管空隙中の相対湿度の低下であること、また厳しい乾燥を受ける際の収縮変形はゲルの塑性挙動が顕著になりうることを解析的に示した。また、クリープ挙動の解析において、基本クリープが載荷時材齢とともに増大する現象、及び乾燥クリープが載荷時材齢の増大により減少する傾向等、適切に予測することに成功した。以上の検証を通り、提案のモデルに基づき、構造物の受ける環境条件、養生条件を解析条件として変化させることのみによって、短期間から長期間にわたるコンクリートの収縮による時間依存変形を自動的に予測されていた。

以上を項目ごとにまとめると、下記のようになる。

1) 細孔構造を層間空隙、ゲル空隙、毛細管空隙に分類し、それぞれに保持される水分の熱力学的状態量と対応する細孔構造の変形モデルとを結合することで、時間－平均応力－平均ひずみの関係を自己完結型（数学上の完備性）に規定することが可能であることを示した。応力変形状態により化学反応過程は影響を受け、形成される固体組織も応力履歴の影響を理論的には受けるが、セメント水和反応過程での活性化エネルギーの水準を考慮すれば、対象とした応力範囲で十分に無視できるものとした。

2) 提案した構成則自体は材料表面で規定される環境条件に依存することなく、対象地点での熱力学的諸量のみで規定され、自己収縮、乾燥収縮、乾燥クリープ変形等は、熱力学的境界条件の違いに対応した構造応答（結果）と位置づけられる。すなわち、構成則導出においては、乾燥収縮とクリープといった異なる境界条件に対応する変形成分(特別解)の加算に依る必然は、必ずしも無いことを示した。

3) 内在する体積収縮の駆動力に、凝縮水の圧力降下（主に毛細管空隙と

ゲル空隙) と固体表面エネルギーに代表される Van der Waals 力(ゲル空隙)の両者を考慮することで、構成モデルの適用範囲を広い湿度域と温度の組み合わせに拡張することが可能となった。

4) 細孔構造寸法の違いと、そこに貯留する水分の熱力学的状態を個々に評価することで、短期間に発生する時間依存性と長期間にわたって継続する時間依存変形の両者を、同じ計算スキーム上で扱い得ることが検証から示された。定性的に妥当な結果を与えるものの、個々の精度については、微細構造に立脚した特性モデルの精度向上が不可欠である。1950-60年代の実験データとの適合性は、近年のデータと比較して幾分、劣る傾向にある。本解析では、セメントの鉱物組成の違いは水和反応速度と細孔組織構造の違いに既に反映されてはいるが、更にゲル粒子の有する変形性と鉱物組成の関連が解明されなければならない。

自己収縮、乾燥収縮、基本クリープ、乾燥クリープごとに独立して変形を記述し、環境条件ごとに組み合わせることは、優れた設計実務上の手法である。適切な補正を施せば、所定の精度で材料の時間に依存する応答を評価できる。一方で、ひずみ成分の加算則が、硬化体組織の微視的レベルでの変形機構の解明を遅らせた側面も否定し難い。細孔構造変形モデルの適用範囲を広げつつ、ひずみ加算則の適用範囲の再評価に繋げることも、今後の課題の一つである。