

微細空隙内の水分状態に基づいた時間依存変形モデルの高度化

東京大学大学院 正会員 浅本 晋吾
 東京大学大学院 正会員 石田 哲也
 東京大学大学院 正会員 前川 宏一

1. はじめに

コンクリートの時間依存変形は、長期に渡って持続的に発生する特徴的な物性である。従って、精度の高い時間依存変形予測モデルの構築は、既存・新設コンクリート構造物の長期品質を適切に評価するうえで大きな貢献をなすものと考えられる。こうした背景のもと、著者らは、セメント硬化体の水和・水分分布・細孔構造などの微視的な熱力学的状態量を巨視的な構造応答と連成させ、時間依存変形を追跡するマルチスケール解析システムの開発を進めている。本研究では、1000日を超える長期的な持続変形挙動に着目して、各細孔に存在する水分の役割について再検討を行い、既存マルチスケール複合構成モデルの高度化を試みた。

2. マルチスケール複合構成モデル

コンクリート材料の熱力学連成解析システム $DuCOM^1$ の開発に伴い、任意の環境下で水和反応、空隙構造形成、水分保持・移動などの空間情報を時系列で得ることが可能になった。 $DuCOM$ から出力される微視的な熱力学状態量に立脚し、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・変形駆動力を構造力学解析システムに組み入れることで、巨視的な構造応答を得る統合解析システムが近年提案された。コンクリートを骨材、セメント硬化体の二相系モデルとみなし、骨材は完全弾性体、セメント硬化体に関しては各空隙内の水分状態に応じた水和殻変形モデルが水和の進行とともに増大するモデル化がなされている²⁾(図1)。先行研究²⁾によって、常温恒湿環境において一定精度で収縮・クリープの予測が可能であることが検証されている。

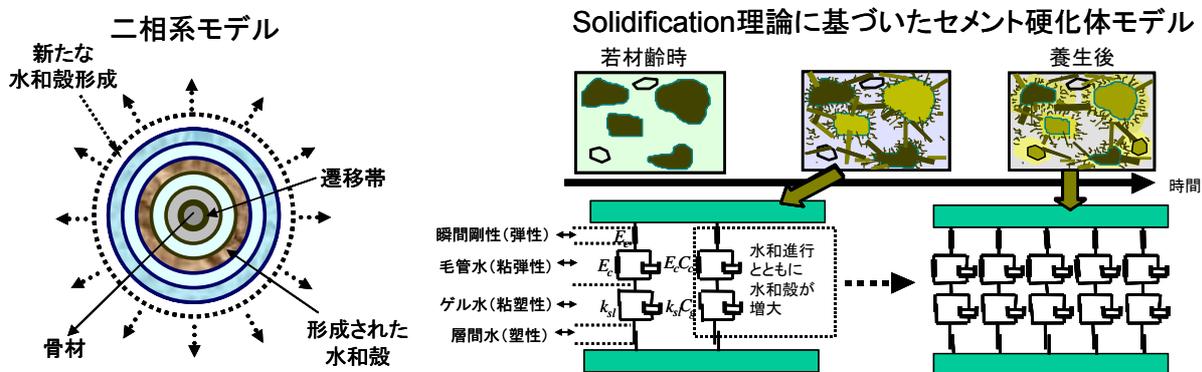


図1 マルチスケール複合構成モデル

3. 長期の挙動に着目したゲル空隙変形モデルの高度化

セメント硬化体のクリープ・収縮は長期に渡って進行するため、長期的な変形挙動の観点から既存モデルの検討を行った。計測期間が1000日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(図2)。まずは単純に、変形速度を決定する既存のパラメータを調整することで、実験で見られる長期に渡って持続する時間依存挙動が表現可能であるか否か検討を行った。その結果、パラメータの精緻化のみでは緩やかに進行するクリープ変形挙動を再現できず、微視的機構に立ち返った新たなモデルの提案が必要であることが判明した。従って、各細孔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た。

マルチスケール複合構成モデルでは、図1に示されるように、仮想水和殻のレオロジーモデルとして、寸法や形態が異なる各空隙内の水分状態に応じた力学モデルを採用している。長期的な変形挙動は微細なゲル空隙内の水分滲出に依存すると考えられるため、ゲル空隙内の水分状態に着目して検討を行った。力学モデルにおけるゲル空隙は、既往の空隙構造モデル¹⁾に従い、C-S-Hゲル粒子が新たに析出できない空間として定義されている。これは

キーワード: 長期時間依存変形, ゲル空隙, 水和物析出空間, 仮想水和殻

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 TEL:03-5841-6147 FAX:03-5841-6010

C-S-H ゲル粒子内部の空隙をゲル空隙とみなすものとは異なり、ゲル粒子内部に取り込まれる空隙と、隣接するゲル粒子に挟まれている空隙の両者を含んだ形でゲル空隙を表現している³⁾。しかしながら、ゲル粒子内部とゲル粒子間は空間スケールが大きく異なり、各空隙内の水分挙動は物理的に異なると思われる。既存の時間依存変形モデルでは取り扱いの簡便さからこれらのゲル空隙内の水分滲出を平均化して変形をモデル化していた(図1)が、1000日を越える持続的な変形挙動はゲル粒子内部に存在する分子レベルの水分滲出が支配的要因であると考えた。従って、ゲル空隙変形モデルをゲル粒子内部(ゲル空隙 S)の水分滲出とゲル空隙間(ゲル空隙 L)の水分滲出に分離してモデル化を行った。モデルの概略を図3に示す。数 nm の空隙内に存在する水分は固体壁ポテンシャルの影響を受けると考えられ、ゲル空隙 S の変形速度を決定するパラメータは 1 オーダー大きくした。新たなゲル空隙変形モデルを組み入れ、解析した結果を図2に示す。その結果、既存モデルではクリープ変形が実験より早く収束していたのに対し、提案モデルは 1000 日を越える持続的なクリープ挙動を再現でき、時間依存変形の長期予測が改善された。

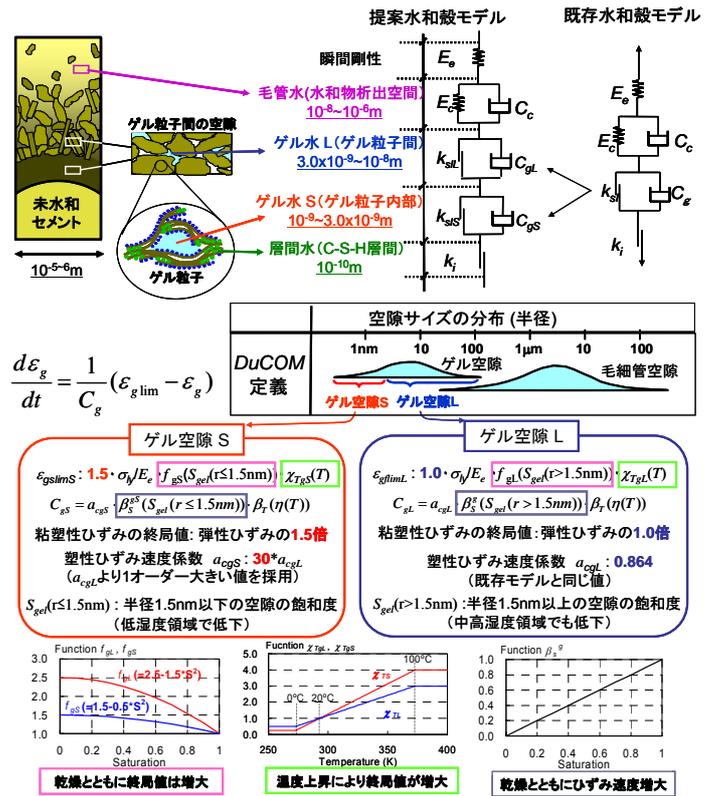
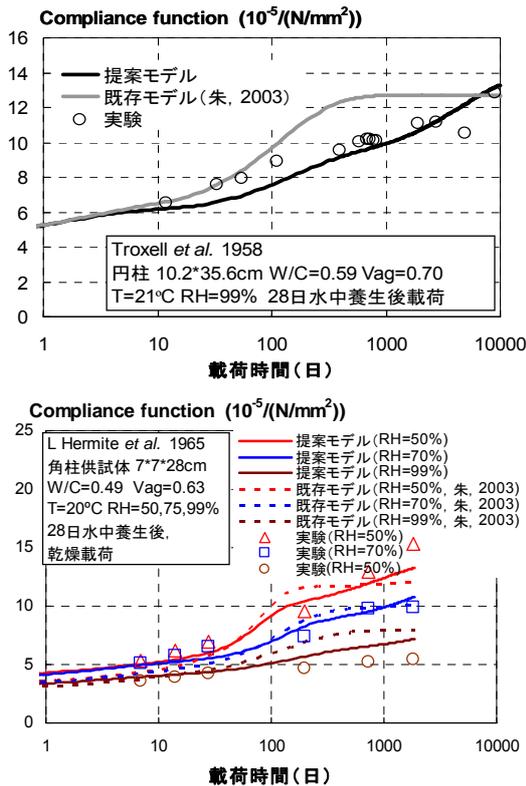


図2 既存モデルの解析結果と提案モデルの検証

図3 ゲル空隙の分類と力学モデルの概要

4. 結論

長期的な変形予測の観点から材料構成モデルを再検証し、その有意性について検討した。ゲル粒子内、ゲル粒子間に存在する水分を各々の輸送特性に応じて分離してモデル化を行い、長期的な変形予測の改善を図った。その結果、提案モデルによって長期的な時間依存挙動の精度向上が達成された。

参考文献

- 1) Maekawa, K., Chaube, R. P., and Kishi, T.: Modeling of Concrete Performance, *E & FN SPON*, 1999
- 2) 朱銀邦, 石田哲也, 前川宏一: 細孔内水分の熱力学的状態量に基づくコンクリートの複合構成モデル, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.241-260, 2004.5
- 3) 半井健一郎, 石田哲也, 岸利治, 前川宏一: セメント硬化体組織構造の温度依存性にに基づく熱力学連成解析の高度化, 土木学会論文集, No.802/V-69, pp.61-78, 2005.11
- 4) Troxell, G. E., Raphael, J. E. and Davis, R. W.: Long-time creep and shrinkage tests of plain and reinforced concrete, *Proceeding of ASTM*, 58, pp.1101-1120, 1958
- 5) L'Hermite, R. G., Mamillan, M. and Lefevre, C.: Nouveaux resultants de recherches sur la deformation et la rupture du beton, *Ann. Inst. Techn. Batiment Trav. Publics*, pp.207-208, pp.323-360, 1965