

## 8 セメント水和反応機構に基づいたコンクリートの材料特性予測手法 Prediction of the property of concrete based on the cement hydration mechanism

(研究期間 平成 11～13 年度)

材料研究グループ

Dept. of Building Materials and Components

杉山 央

Hisashi Sugiyama

Synopsis - The mathematical model for the hydration of cement and the formation of microstructure was developed in this study. With this model, the strength development of concrete was quantitatively predicted. We found it useful as a starting point for accomplishing a new design and production system for concrete, based on the hydration of cement.

**【研究目的及び経過】** 近年、材料技術の進歩や社会的ニーズの多様化に呼応してコンクリートに要求される性能も高度化・高機能化してきた。今後は、性能規定化への移行に伴って、さらに多種多様のコンクリートが開発されると予想される。このため、いかなる種類のコンクリートにも適用できる普遍的な材料特性予測手法の開発が必要とされている。このニーズに応えるためには、セメントの水和反応機構に基づいてコンクリートの材料特性を予測する手法を検討する必要がある。硬化過程にあるコンクリートの材料特性はセメントの水和反応に支配されており、材料特性値は水和反応の進行とともに経時的に変化する。

本研究では、コンクリートの重要な材料特性である強度発現を取り上げ、セメント水和反応機構の基礎理論に立脚したコンクリートの強度発現予測手法を開発した。

**【研究内容】** これまでに、セメントの水和反応モデルはいくつか提案されている。しかし、既存の水和反応モデルでは水和反応率を算出するだけにとどまっており、コンクリートの材料特性を的確に説明できない場合が多々あった。コンクリートの材料特性を的確に予測するためには、セメントの水和反応率だけではなく、コンクリートの硬化過程を支配する水和セメント組織の形成過程をシミュレートする必要がある。本研究では、まず、セメントの水和反応過程および水和セメント組織の形成過程を忠実にシミュレートすることが可能なシステムを構築した。

そして、本セメントの水和反応・組織形成モデルを用いて、水和セメント組織の形成過程をシミュレートし、この結果をもとにセメントペースト中の総細孔量を算出した。続いて、セメントペースト中の総細孔量とセメントペースト強度の関係式を求め、セメントペーストの強度を算出した。さらに、セメントペースト強度とコンクリート強度の関係式を求め、コンクリートの強度を算出

した。この結果、初期高温履歴を受けたコンクリートなどの特異な強度発現も的確に予測することが可能となった。

**【研究結果】** 次のような特徴を有するセメントの水和反応・組織形成モデルを開発した。

(1)セメント粒子内に拡散する水とつり合う量のセメント成分がセメント粒子外に拡散するという新たな理論を導入し、この過程を非定常拡散法則を適用して表した。

(2)水和反応速度は水の濃度およびセメント成分の濃度の両方に比例すると仮定した2次反応を導入した。

(3)モデルを単純化させるため、セメント粒子は、同一径を有する球形であり、水の中では面心立方の空間格子に従って分布すると仮定した。図-1に示すように最近接セメント粒子の中間に面を挿入すると、各々のセメント粒子がセルの中に閉じこめられる。これを同じ容積の等価球にモデル化したセルを1つのユニットと考えた。

(4)セメントの主成分である  $C_3S$  および  $C_2S$  の複数成分によりシステムを構成した。図-2に、セル中の水、 $C_3S$  および  $C_2S$  の濃度分布の例を示す。

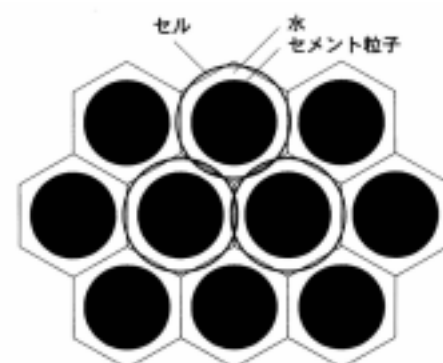


図 - 1 セメント粒子と水により構成されるセル

Fig.1 Concept of the cell that consists of a cement particle and water

(5)セメントの水和反応率に加えて、水和セメント組織の形成過程を組織形成率（水和セメント組織中に占めるセメント水和物の相対容積）という指標を用いて定量的に表すことを可能にした。

セメント粒子の水和セメント組織の形成過程をシミュレートし、この結果、出力された組織形成率を用いてセメントペースト中の総細孔量を算出した。セメントペースト中の総細孔量とセメントペースト強度には密接な関係がある。図-3は両者の関係式を求めて、セメントペーストの強度発現を予測した例（低熱ポルトランドセメント使用、水セメント比40%）である。図中で、20Sは20一定養生を表し、A60は初期高温養生（材齢1日に60の高温養生を行った）を表している。

続いて、セメントペーストの強度発現予測結果に使用骨材の種類・形状・量の影響を加味し、コンクリートの強度発現を予測した。図-4は、水セメント比40%のコンクリートの強度発現を予測した例である。セメントペーストおよびコンクリートの予測強度は実測強度とほぼ一致していることがわかる。特に、A60の実測値では初期高温履歴の影響により、20Sに比べて初期強度は大きく、反対に長期強度は小さくなる傾向を示しているが、予測強度はこの傾向を的確に表している。

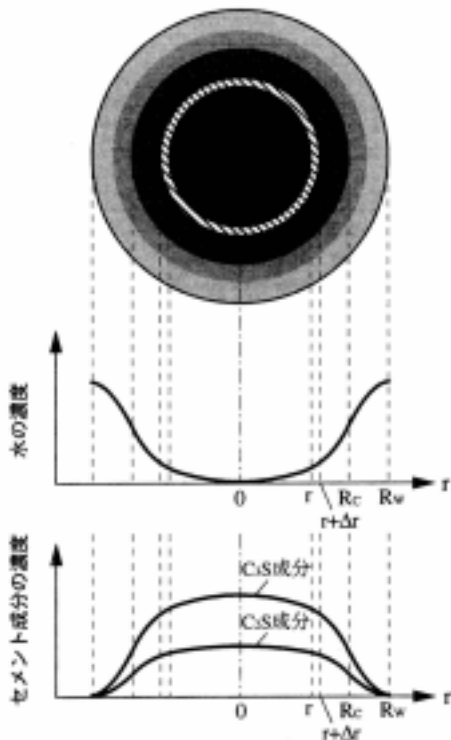


図-2 セル中の水およびセメント成分の濃度分布  
Fig.2 Concentration distribution of water and cement in the cell

以上のように、本研究では、セメントの水和反応・組織形成を起点としたコンクリートの新たな材料設計システムを確立する上での出発点を提示することができた。

【備考】 詳細については以下の論文を参照のこと。

- 1) 杉山 央;非定常拡散理論に基づくセメントの水和反応・組織形成モデル、セメント・コンクリート論文集、第53号、pp.35~42、1999.12
- 2) 杉山 央;セメントの水和反応および微細組織形成に及ぼす初期高温履歴の影響、セメント・コンクリート論文集、第54号、pp.638~645、2000.12
- 3) 杉山 央;セメントの水和反応・組織形成モデルを用いたコンクリートの強度発現推定、セメント・コンクリート論文集、第54号、pp.646~653、2000.12

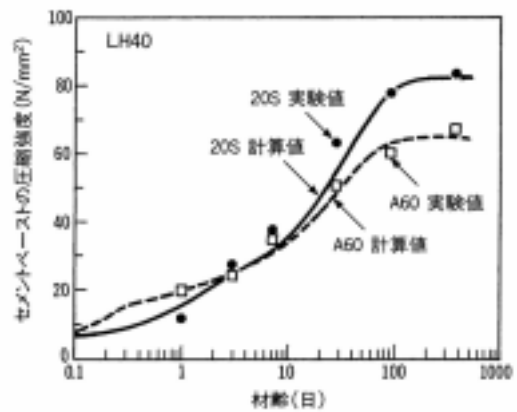


図-3 セメントペーストの強度発現予測結果  
Fig.3 Prediction of strength development of cement paste

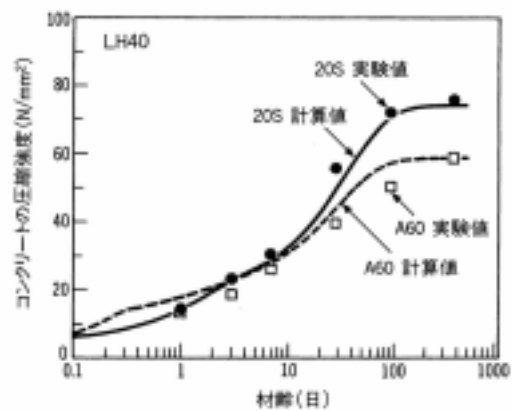


図-4 コンクリートの強度発現予測結果  
Fig.4 Prediction of strength development of concrete