

# コンクリートの硬化特性予測モデルを用いた 材料設計技術

材料研究グループ 上席研究員 杉山 央

## はじめに

性能規定化への移行に伴って、要求性能に基づいた新たなコンクリート材料設計手法の開発が求められている。しかし、コンクリートは使用セメント・骨材の種類、調合、養生時の環境条件（特に温度）などによって硬化後の性質が大きく変わる材料であり、このような性状をすべて考慮した材料設計は困難とされてきた。

一方、コンクリートの硬化過程および硬化後の性質はセメントの水和反応の進行およびその生成物である微細組織の形成状況に支配されている。使用材料、調合、環境条件などの影響も含め、セメントの水和反応および微細組織形成を精緻にシミュレートし、コンクリートの硬化特性を予測することが可能になれば、コンクリートの合理的な材料設計技術が実現できる。

建築研究所では、セメントの水和反応・組織形成シミュレーションを起点としてコンクリートの硬化特性を予測する技術を開発し、これを利用したコンクリートの材料設計技術の検討に取り組んでいる。

## セメントの水和反応・組織形成モデル

コンクリートの新たな材料設計技術の起点となるセメントの水和反応・組織形成モデルを開発した。本モデルには、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非定常拡散理論、および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次反応の理論を導入している。これにより、アウトプットとしてセメントの水和反応率のみならず、セメント水和物による組織形成率を算出することができる。

## コンクリートの強度発現予測

セメントの水和反応・組織形成モデルを用いてセメントの水和反応および組織形成過程をシミュレートし、セメントペースト内の細孔量を計算する。次に、細孔量とセメントペースト強度の関係式より、セメントペーストの強度発現を予測

する。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より、コンクリートの強度発現を予測する。

## コンクリートの発熱特性予測

セメントの水和反応・組織形成モデルを用いてセメントの水和反応過程をシミュレートし、それに伴って発生する水和熱量を計算する。このセメントペースト部分から発生した水和熱が骨材に伝わる現象を微分方程式で表し、これを解くことによりコンクリートの温度が上昇する過程を予測する。

## コンクリート部材内の温度分布・強度分布予測

コンクリートの強度発現予測モデルおよび発熱特性予測モデルをコンクリート部材内の3次元FEM解析の形に拡張させた。これにより、コンクリート部材内の各位置でのセメント水和反応率、組織形成率、細孔量、水和熱量、温度および強度の分布を算出することができる。

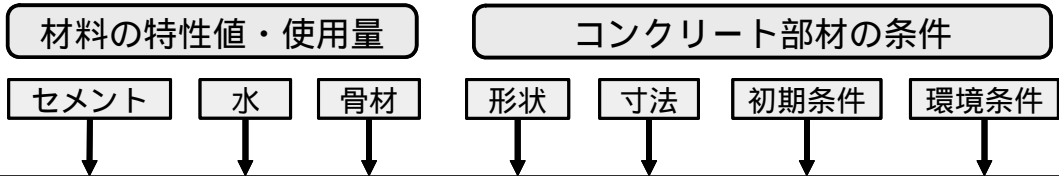
## コンクリートの調合・養生計画最適化システム

～ に示したように、セメント・骨材など使用材料の特性値、コンクリートの調合、部材の形状・寸法、養生方法、環境条件など各種の情報・条件をもとにしたコンピュータ解析により、コンクリートの材料特性を精緻に予測することができる。さらに、この予測モデルを利用して、コンクリートの最適な調合設計や養生計画を導出するシステムを開発している。

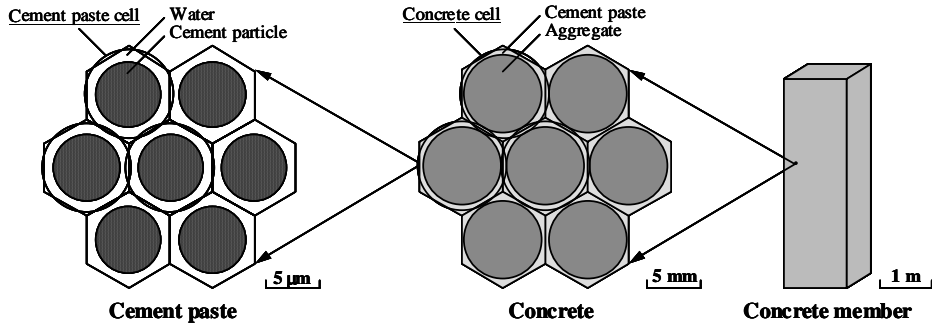
最初に、要求性能（目標値）を設定する。続いて、コンクリートに関する既知の情報（不変の情報）を入力することにより、硬化過程にあるコンクリートの材料特性をシミュレートする。このシミュレート結果をもとにして最適化演算を実行し、要求性能を満足させるための調合や養生に関する最適解を出力する。

パネル展示では、これらの詳細な技術内容を説明するとともに、セメントの水和反応・組織形成、コンクリートの強度発現・温度履歴等のシミュレーション、調合や養生に関する最適化演算などのデモンストレーションを行う。

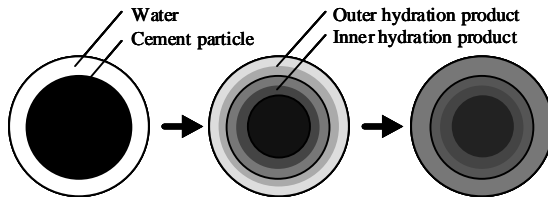
《既知の情報・条件を入力》



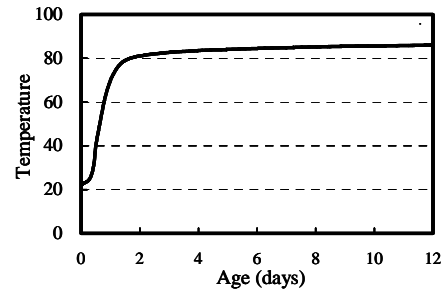
《セメントの水和反応およびコンクリートの硬化・発熱予測》



Scale level concept on microstructure for concrete

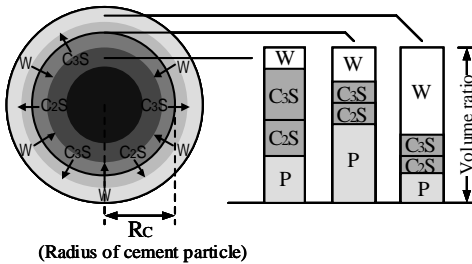


Hydration process of a cement particle

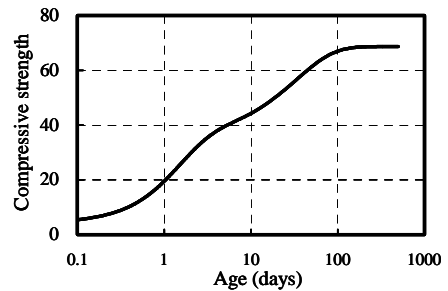


Simulation of adiabatic temperature rise

W: Water, C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S: Cement compounds, P: Hydration product



Volume ratio of hydration product



Simulation of strength development

《最適解の出力》

最適化演算プログラム

要求性能を満足するための最適解を出力