

## 科学研究費補助金による研究開発

### - 1 セメントの水和反応・組織形成シミュレーションによる コンクリートの材料特性予測

#### Prediction of properties of concrete using mathematical model for hydration of cement and formation of microstructure

(研究期間 平成 14~15 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 of hydrated cement has been proposed in our previous study. The model deals with the diffusion of water into cement particles and the diffusion of cement compounds out of cement particles. The model enables to predict the effects of specific surface area of cement, content of C<sub>3</sub>S and C<sub>2</sub>S, water-cement ratio and curing temperature on the cement hydration process as well as on the microstructure formation process. In this paper, the strength development of concrete and the adiabatic temperature rise of concrete, which is the typical exothermic phenomenon of concrete, are numerically simulated using the model.

**【研究目的及び経過】** コンクリートは、使用セメントの種類、調合、養生方法などの各種条件によって、その特性が大きく異なる材料である。このため、コンクリートの材料特性を的確に予測することは困難と考えられてきた。しかし、コンクリートの材料特性はセメントの水和反応の進行および微細組織の形成に支配されているため、これらをシミュレートすることが可能になれば、コンクリートの材料特性を予測することができる。

本研究では、これまでの研究により開発したセメントの水和反応・組織形成モデルを用いて、コンクリートの材料特性の中でも特に重要である強度発現および発熱特性を予測する手法を提案した。

なお、本研究は、平成 14~15 年度科学研究費補助金・若手研究 (B) として実施したものである。

**【研究内容】** 下記について検討した。

#### (1) 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過程をシミュレートし、それに伴って形成される微細組織の細孔量を計算した。次に、細孔量とセメントペースト強度の関係を求め、セメントペーストの強度発現を予測した。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を求め、コンクリートの強度発現を予測した。

#### (2) コンクリートの発熱特性予測

ここでは、コンクリートの発熱特性を示す指標として重要である断熱温度上昇を予測の対象とした。まず、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

水和熱量を計算した。次に、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り、コンクリートの温度が上昇する断熱温度上昇過程をシミュレートした。

#### (3) 適合性の検証

上記(1)および(2)で提案した予測手法の実測値との適合性を検証するための実験を行った。すなわち、種々のセメント種類・調合のコンクリートについて強度発現および発熱特性を調べた。

**【研究結果】** ここでは、コンクリートの発熱特性予測の結果を示す。

セメントの水和反応・組織形成モデルは、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新たな理論の導入、□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 次反応の理論の導入することにより、セメントの水和反応率のみならず、微細組織の形成状況を表すことができる。例えば、図 1 に示すように 1 個のセメント粒子とその周囲の水により構成されるセメントペーストセル内の水・C<sub>3</sub>S・C<sub>2</sub>S の非定常拡散をシミュレートすることにより、それぞれの濃度の変化を表すことができる。その流れを図 2 に示す。

セメントの水和反応・組織形成モデルでは、アウトプットとして、セメントの水和反応率とセメント水和物による組織形成率が算出されるが、コンクリートの発熱特性予測には前者を用いる。図 3 にコンクリートの断熱温度上昇予測の流れを示す。まず、セメントの水和反応率より水和発熱速度を計算する。次に、セメントの水和熱が骨材に伝熱する現象をシミュレートする。続いて、

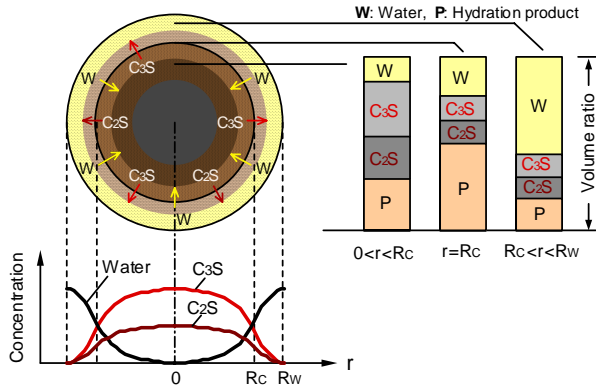


図 1 セメントペーストセル内の水・C3S・C2S の分布

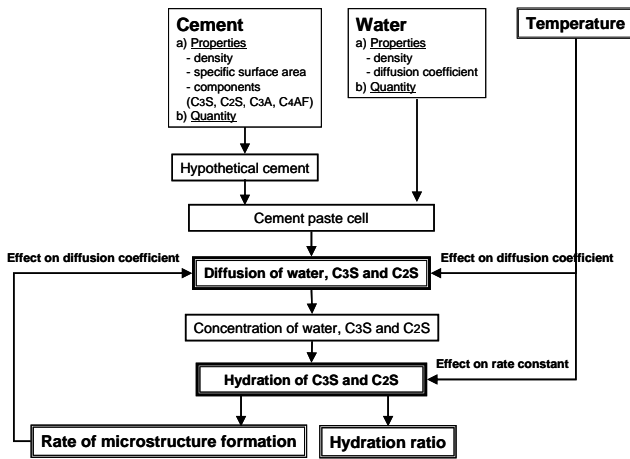


図 2 セメントの水和反応・組織形成モデルの流れ

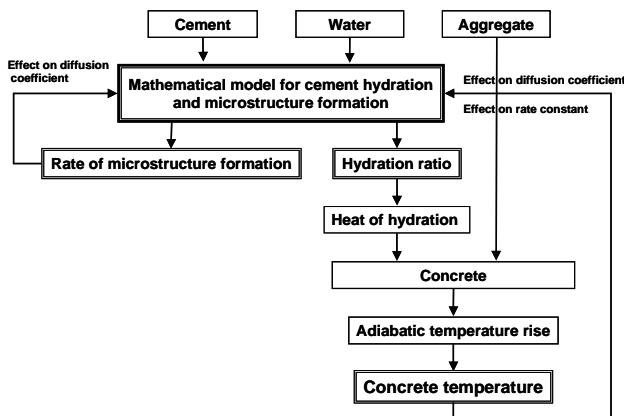


図 3 コンクリートの断熱温度上昇予測の流れ

セメントペーストと骨材を含めたコンクリートの温度上昇量を計算する。この際、断熱状態を仮定しているため、セメント水和熱の外部への流出はないものとした。

図 4 および図 5 に予測結果の一例を示す。図 4 は、早強ポルトランドセメントを用いたコンクリート（記

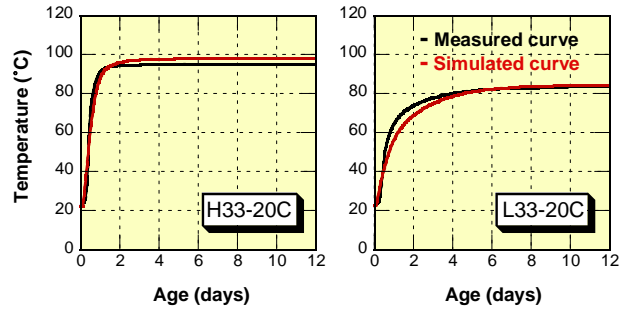


図 4 断熱温度上昇の実測値と予測値(セメント種類)

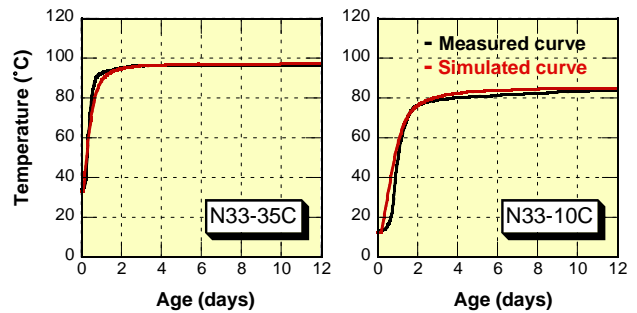


図 5 断熱温度上昇の実測値と予測値(初期温度)

号：H33-20C) ならびに低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリート（記号：L33-20C）の結果である。水セメント比は 33%、初期温度は 20 である。図 5 は、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比が 33% のコンクリートで、初期温度が 35（記号：N33-35C）ならびに 10（記号：N33-10C）の結果である。いずれも実測値と比較すると、高い精度の予測ができてい

【備考】 本研究の成果として発表した査読付論文を、以下に示す。

- 1) 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発熱シミュレーション、日本建築学会構造系論文集、第 565 号、pp.9-16、2003.3
- 2) H. Sugiyama: Prediction of Strength Development of Concrete Using Mathematical Model for Hydration of Cement and Formation of Microstructure, 6th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, pp.417-431, 2003.6
- 3) H. Sugiyama: Simulation of Adiabatic Temperature Rise of Concrete Using Mathematical Model for Hydration of Cement and Formation of Microstructure, 7th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances Concrete Technology, 2004.5