

# 論文 微視的機構に基づくコンクリートの自己, 及び乾燥収縮に関する解析的検討

石田哲也\*1 · R. P. CHAUBE\*2 · 岸利治\*3 · 前川宏一\*4

要旨：水和進行時の自己乾燥によって発生する毛細管張力を自己収縮を引き起こす要因として捉え、微視的機構に基づく自己収縮挙動の解析的検討を行った。その結果、コンクリート中の細孔径分布と含水状態を考慮することにより、微視的機構に基づく乾燥収縮予測法と同じ方法によって、自己収縮も同様に扱い得ることを明らかにした。

キーワード：自己収縮, 乾燥収縮, 毛細管張力, 細孔組織構造, 水和反応, 含水状態

## 1. はじめに

締固めの影響を排除し、施工の良否に関わらず信頼性の高い品質を達成する自己充填性ハイパフォーマンスコンクリート[1]は一般に水粉体比が低く、従来まであまり問題とされなかった自己収縮による体積変化を、ひび割れ制御や耐久設計において考慮する必要があるとの報告されている[2]。セメント系粉体材料の水和過程においては、水和生成物の体積が、水和以前の粉体及び水の体積和より小さくなることが知られている。従って、外部からの水の補給が無い場合には、硬化体中に生成された空隙内を液状水で占めることが出来なくなり、細孔中の相対湿度は水和反応とともに低下していく。この現象は、自己乾燥といわれ自己収縮を引き起こす機構として捉えられている[2]。

本研究では、空隙内の湿度低下が招く、水の表面張力に起因する空隙内の負圧である毛細管張力が収縮応力を発生させ、自己収縮及び乾燥収縮両方の現象を引き起こす起動力と仮定するものである。収縮応力及び収縮応力に対する組織の変形性は、計算される水湿度に基づきモデル化する。ここで、若材齢におけるコンクリートの材料特性は細孔組織構造、水和反応、水分移動現象の相互依存性を考慮した連成解析によって得るものとし、任意の条件に対し、乾燥収縮・自己収縮による体積変化現象を、微視的な同一のメカニズムに基づくモデルに従って統一的に扱うことを試みる。

## 2. 解析モデル

### 2. 1 細孔組織構造形成モデル[3]

細孔構造形成のモデル化に際し、本研究では水和によって生成する硬化体中の空隙を層間空隙、ゲル空隙及び毛細管空隙に分類する。反応粉体は全て同一粒径を持つ球状粒子から構成されると仮定する。図1に任意の水和段階における細孔形成の概要を示す。粒子表面より外部への析出により外部生成物が形成され、一方内部生成物は水和以前の粒子表面内部に形成される。

内部生成物及び外部生成物中に析出されるC-S-H結晶の特性は、水和過程を通して一定と仮定し、結晶粒子の保有する空隙率は0.28[4]の値を採用することにした。ゲル空隙及び層間空隙はこの結晶

\*1 東京大学大学院博士課程 工学系研究科社会基盤工学専攻, 工修 (正会員)

\*2 東京大学インテリジェントモデリングラボラトリー中核的研究機関研究員, 工博 (正会員)

\*3 東京大学講師 工学系研究科社会基盤工学専攻, 工博 (正会員)

\*4 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻, 工博 (正会員)

中に含まれる。また、毛細管空隙は、外部生成物中の C-S-H 粒子で占められない空隙に相当する。これらの仮定から、鉱物毎の水和度の平均 $\alpha$ 及び水和した単位粉体重量あたりの結合水重量 $\beta$ が与えられたとき、ゲル粒子の重量 $W_s$ 及び体積 $V_s$ が求められる。また、本研究では反応後の結合水の比重を $\rho_w=1.25$ とし[4]、反応前後の粉体及び水の体積変化を考慮している。以上より、層間空隙、ゲル空隙及び毛細管空隙の空隙率 $\phi_l, \phi_g, \phi_c$ 、及び生成したゲル粒子の体積 $V_s$ は以下の様に求められる[3]。

$$\phi_l = \frac{t_w s_i \rho_g}{2} \quad \phi_c = 1 - V_s - (1 - \alpha) \frac{W_p}{\rho_p} \quad (1)$$

$$\phi_g = \phi_{ch} V_s - \phi_l \quad V_s = \frac{\alpha W_p}{1 - \phi_{ch}} \left( \frac{1}{\rho_p} + \frac{\beta}{\rho_w} \right) \quad (2)$$

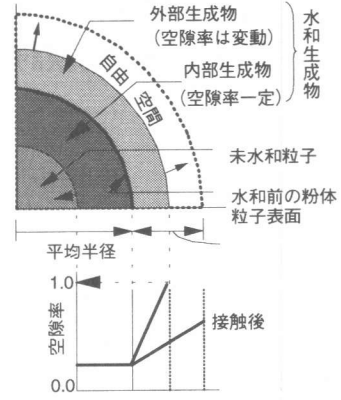


図1 水和の進行に伴う細孔構造形成モデル

ここで、 $t_w$ ；層間空隙の厚さ(2.8Å)、 $s_i$ ；層間空隙の固有表面積、 $W_p$ ；単位ペースト体積あたりの粉体重量、 $\rho_p$ ；粉体密度、 $\rho_g$ ；結晶の乾燥密度である。 $\phi_{ch}$ は結晶粒子の保有空隙率で0.28とした。

外部生成物の空隙率、及び生成したゲル粒子の重量から毛細管空隙、及びゲル空隙の表面積を求め、以下の細孔分布密度関数<sup>[5]</sup>によって細孔構造を表現することとする。

$$\phi(r) = \phi_l + \phi_g \{1 - \exp(-B_g r)\} + \phi_c \{1 - \exp(-B_c r)\} \quad (3)$$

ここで、 $r$ ；細孔半径[m]であり、形状を決定するパラメータ $B_c$ 及び $B_g$ は毛細管空隙とゲル空隙を円筒形状と仮定した際の空隙率及び表面積の値より求めることができる。

## 2. 2 複合水和発熱モデル[6]

水和反応過程は、粉体の鉱物組成に基づく複合水和発熱モデルを用いて追跡する。本モデルでは、粉体中の反応をクリンカー鉱物毎に記述し、鉱物反応間の相互依存性を考慮することによって、任意の種類粉体に対し水和発熱現象が予測可能である。また、水和進行中に変化する自由水量の影響も考慮される。単位体積あたりのコンクリートの全発熱速度 $H$ は次式で与えられている。

$$H = C \sum p_i H_i \quad H_i = H_{i,T_0} \exp \left[ -\frac{E_i}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (4)$$

ここで、 $C$ ；単位粉体量、 $p_i$ ；各鉱物の組成重量率、 $H_i$ ；各鉱物の発熱速度であり、温度依存性はアレーニウス則に基づく。また $E_i$ ；鉱物 $i$ の活性化エネルギー、 $R$ ；気体定数、 $H_{i,T_0}$ ；基準温度 $T_0$ における鉱物 $i$ の基準発熱速度である。基準発熱速度 $H_{i,T_0}$ は水和の進行を促す水と未水和鉱物との接触確率に依存する。本モデルでは基準発熱速度を自由水量、未水和の鉱物近傍に生成された水和生成物の殻厚さに関する係数、及び各鉱物の積算発熱量の関数として表現する。ここでの自由水量は、細孔形成モデル、水分保持及び移動モデルから求まる細孔中の凝縮液状水である。

上記の複合水和発熱モデルによって、鉱物毎の平均水合度 $\alpha$ 、及び化学量論的に求まる水和生成物に取り込まれる化学的結合水 $\beta \cdot W_p$ が任意の水和過程において求められる。この情報は、細孔組織形成を表現するに際しての必要なパラメータである。また水和反応によって消費される化学的結合水は、次節で考慮する水分量に関する保存則に取り込まれることになる。