

# 論文 細孔径に依存した水分拡散を導入した空隙構造モデルに関する研究

大槻 浩平<sup>\*1</sup>・大下 英吉<sup>\*2</sup>

**要旨:** コンクリート構造物の耐久性評価に際して、細孔壁面に存在する未水和セメントとの水和反応生成を伴う水分移動モデルの構築は非常に重要な意味を持つと考えられる。そこで本研究では、細孔空隙中液状水の挙動特性を既往の空隙構造モデルの拡張という形で行うとともに、その定性的な評価を実施した。その結果、従来の空隙構造モデルでは表現が困難であった浸透速度を固体の反応速度を一定とした上で、空隙構造で定義された拡散現象と水和反応とを区別するとともに、水分量に応じた水分の拡散・反応連成モデルへと拡張した。

**キーワード:** 水和反応, セメントペースト, 空隙構造, 浸透速度, 透水係数

## 1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性能には、多孔質材料の空隙特性と力学的特性に強い相関があり、ミクロレベルにおける空隙構造の特徴に基づいてコンクリートのマクロな物性の説明を試みようとするモデルが多く提案されている<sup>1)~5)</sup>。

しかしながら、既往の空隙構造モデルの多くは、マクロな諸物性の予測に主眼が置かれているため、簡易的なパラメータを用いた近似式で空隙構造をモデル化しているのが現状である。また、これらの多くは、セメント 1 粒子においてその内部に向かって平均的に水和反応が進行するという仮定を設定している。すなわち、既反応層内の空隙構造に依存した水分拡散性状を忠実に再現せずに、その内部の未反応層との反応が理想的に進行するとしている。したがって、早強セメントを使用した場合や高温養生の際に見られる未反応セメントの存在や空隙構造の粗大化という実現象の再現性が困難となっている。

このような問題を解決する策として、未反応のまま残存する径をあらかじめ規定しておき、実現象との整合性を取る例もある<sup>4)</sup>。また、著者らのモデル<sup>5)</sup>もその例外ではなく、セメント硬化体を構成する物質の観点、未水和セメントの粒度変化を考慮して空隙構造をモデル化した例は無い。そのため、反応層の空隙構造に依存した水分拡散と水和反応を同時に評価可能とするモデル、すなわち、反応しながら拡散するというモデルの構築が望まれている。

そこで本研究では、これまでに提案してきた空隙構造モデル<sup>5)</sup>に空隙構造で定義された拡散現象と水和反応とを区別するとともに、水分量に応じた水分の拡散・反応連成モデルへ拡張した。

## 2. 既往の空隙構造算定モデル<sup>5)</sup>

著者らの提案する既往の空隙構造モデルでは練混ぜ前の材料の初期情報として、セメントの粒度分布を考慮

し、水和反応モデルにより求められる相組成と構成相の粒度変化、特に未水和セメントの粒径に着目して空隙構造を推定するものである。これらの概念図を図-1に示す。ここで、図中の X 軸は各水和物の粒径 ( $\mu\text{m}$ )、Y 軸は相対粒子量 (%) を示す。

本研究の範囲では普通ポルトランドセメントを使用し、セメントペースト W/C=50%、水中条件下を想定し、セメント粒子は練混ぜ開始時には十分に水の中を分散できるスペースを有するものとした。水和物に関しては、セメント粒子に浸透して反応した層およびその外側の周辺に膨張して生成されるものとしている。各クリンカーの反応速度は 20°C における反応速度の初期値を与えた後は、セメント粒子の粒径ごとに異なる水和度に応じて低減するものとしている。また、アレニウス式を採用し反応の温度依存性を考慮している。反応の進行に伴う相組成変化は、クリンカー鉱物ごとの水和反応式と水和度に比例するものと仮定したセメントの水和前からの体積変化率により算定される。

まず、セメントの水和反応は、球状を想定した粒子の中心方向に反応が進行し、水和度と化学反応式から算定される各鉱物の体積変化から相組成を求める方法である。本モデルでは、半径  $r(\mu\text{m})$  のセメント粒子には 4 つの鉱物組成が粒径によらず含有率に応じて均等に存在するとし、以下に示す方法で相組成を求められる。セメント粒子中の鉱物  $i$  の反応を示す幾何学モデルの概念を図-2に示す。

半径  $r(\mu\text{m})$  のセメント粒子における材齢  $t(\text{h})$  での鉱物  $i$  の水和度  $\alpha_i(r,t)$  は、反応厚さを  $x_{i,t}(\mu\text{m})$  とし、もとのセメント粒子の体積に対する反応層の体積とすると、式(1)で示される。

$$\alpha_i(r,t) = 1 - \left(1 - x_{i,t}/r\right)^3 \quad (1)$$

また、材齢  $t$  における反応厚さ  $x_{i,t}(\mu\text{m})$  は、鉱物  $i$  の反応速度  $k_i(\mu\text{m}/\text{h})$  と算定ステップの時間間隔  $\Delta t(\text{h})$  の積の

\*1 中央大学 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

\*2 中央大学 理工学部都市環境学科教授 工博 (正会員)

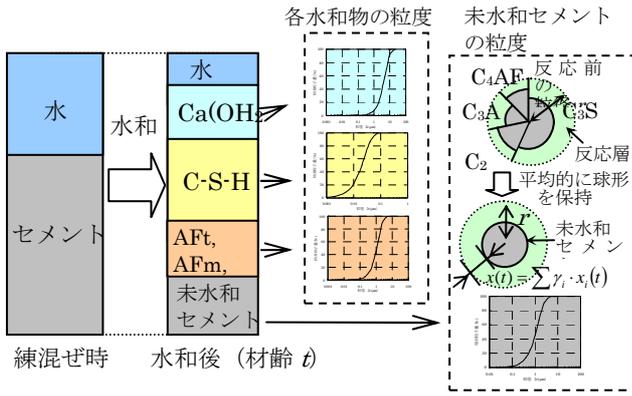


図-1 水和に伴う相組成の変化と構成相の粒度分布

総和として式(2)で表す。

$$x_i(t) = \sum_0^t k_i(r,t) \Delta t \quad (2)$$

反応速度については、温度の影響を強く受けることは周知の通りである。また、水和反応の進行に伴って水和物がセメント粒子の周りに生成され、水和反応に使用する自由水も減少するため、徐々に変化するものと考えられる。例えば、Breugel<sup>1)</sup>は、自由水容積、およびその水和に伴う変化を考慮しており、それぞれについて係数を与えている。これらは水和の進行とともに反応速度が減少するといった低減係数として用いられている。著者らの既往のモデルでは温度依存性と水和度の増加による反応速度の低下を考慮して式(3)により反応速度の律速を表現している。

$$k_i(r,t) = \beta_i(t) k_{i0} \log(1/\alpha_i(r,t)) \quad (3)$$

すなわち、鉱物*i*の反応速度  $k_i$  ( $\mu\text{m}/\text{h}$ )は、 $20^\circ\text{C}$ における反応速度の初期値  $k_{i0}$  ( $\mu\text{m}/\text{h}$ )を与えた後は、セメント粒子の粒径ごとに異なる水和度  $\alpha_i(r,t)$ および鉱物*i*の反応速度の温度依存性を示す係数  $\beta_i(t)$ に応じて変化するものとして表現されている。

しかしながら、実際のセメント粒子の反応を考えると、反応速度は単純に水和度に依存するものではなく、セメント周辺に生成される水和物の影響による自由水の供給量の増減や未水和セメント周辺に存在する水の状態などに依存するものと考えられる。

著者ら<sup>5)</sup>のモデルでは、高温養生のようなセメント1粒子の表面から水和反応が内部に向かって均一に進行するというものである。ここで本研究条件下、材齢28日における実験と解析の比較を図-3に示す。このような高温養生では、粒子表面の空隙構造が緻密になるため、内部への水分移動が阻害されることから空隙構造が粗な状態となり、実現象の再現性に欠けていた。

### 3. 細孔径依存型水分拡散性状の導入による空隙構造モデル

$$v_{m,i}(r,t) = \gamma_i \cdot \frac{4\pi r^3}{3} \cdot \alpha_i(r,t)$$

$$v_{out,i}(r,t) = \gamma_i \cdot \frac{4\pi r^3}{3} \cdot (\alpha_i(r,t) \cdot Ex_i - 1)$$

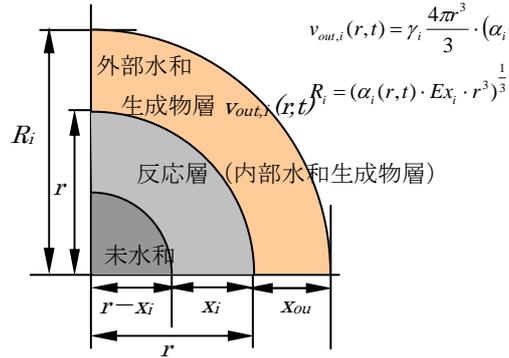


図-2 セメント粒子中の鉱物*i*の反応概念図

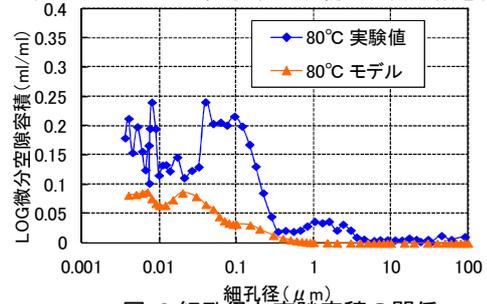


図-3 細孔径と空隙容積の関係

前章では、既往の空隙構造算定モデル<sup>5)</sup>における問題点を明確にした。本章では、この問題点を解消するため、新たに構築した細孔径依存型水分拡散性状の導入による空隙構造モデルについて論じる。また、本研究では水中養生を考え、飽和状態の動水勾配が水分移動の駆動力としている。また本来であれば、水分が凝縮する最大空隙径や内部相対湿度等の議論が必要と考えるが、現段階では既往の空隙構造モデル<sup>3)</sup>と同様なものとする。

#### 3.1 水和反応モデルの拡張

本研究では、水和反応と水分移動が同時に起こる、すなわち水和反応しながら水分移動を生じる、あるいは水分移動を生じながら水和反応するという概念に基づき、水分移動は均一に生じるのではなく、水和反応とともに変化するものとした。一般に、細孔内の水分移動は毛細管張力が駆動力であるが、反応によって細孔構造が密になればそれよりも内部への水分移動が抑制されるため、この現象を捉えるためにも径と透水係数、水和反応度と径および既反応先端での水分量が重要となる。

そこで、これまでに提案してきた空隙構造モデル<sup>5)</sup>に空隙径に依存した拡散現象と水和反応とを区別するとともに、水分量に応じた水分拡散・反応連成モデルへの拡張を試みた。

#### 3.2 相組成および空隙構造

本節では、相組成の算定方法の概要を示す。鉱物*i*が完全水和した際の水和前からの体積変化率  $Ex_i$  は、水和度  $\alpha_i(r,t)$ に比例するものと仮定すると、クリンカー-鉱物ご

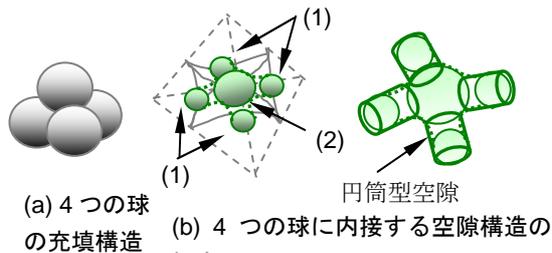


図-4 球状粒子の充填構造と空隙の概念

との水和反応式により求められる。

次に、材齢  $t$  において鉱物  $i$  から生成される粒径（半径） $r$  を有する水和生成物の体積  $v_{Hyd,i}(r,t)$  は、セメント反応層の内部水和生成物の体積  $v_{in,i}(r,t)$  とセメントの外側で生成される外部水和生成物の体積  $v_{out,i}(r,t)$  の和として定義する。

鉱物  $i$  の含有率を  $\gamma_i$  とすると、水和生成物の体積  $v_{Hyd,i}(r,t)$  は、式(4)で与えられる。複数の水和物が生成される場合は、それぞれの生成比率に応じて配分するものとした。

$$v_{Hyd,i}(r,t) = \gamma_i \cdot \frac{4\pi r^3}{3} (\alpha_i(r,t) \cdot E_{X_i} + \alpha_i(r,t) - 1) \quad (4)$$

以上の要領でセメントの粒度分布、鉱物組成、および各クリンカー鉱物における初期の反応速度、反応速度に与える影響因子を与え、化学反応式を仮定することで相組成を算定した。

図-1 に示すように未水和セメントについては、各鉱物により反応速度が異なり、水和の進行に伴って球形を保てなくなるものと考えられるが、各鉱物の含有率に応じて平均的に球を保つように平均的な反応深さを求め、未水和セメント粒径を算定する。水和生成物  $j$  の粒径をセメントと同様に  $r$  として  $G_j(r)$  で表し、相組成の算定結果により求めた材齢  $t$  における水和生成物  $j$  の体積比率を  $\gamma_j(t)$  とし、硬化体の固相は、水和生成物と未水和セメントで構成されていると考え、硬化体全体の粒度分布を式(5)で示す。

$$G(r,t) = \sum \gamma_j(t) G_j(r) + \gamma_c(t) G(r-x(t)) \quad (5)$$

ここで、 $\gamma_c(t)$  は材齢  $t$  における未水和セメントの体積比率で、 $G(r-x(t))$  は材齢  $t$  における未水和セメントの粒度分布である。注水直後はセメント粒子が水中を浮遊して存在している状態であるが、水和反応の進行によって水和物が生成され、固相の粒度変化を示すことができるわけである。

次に、式(5)の粒度を有する粒子の集合体における空隙径分布の算定方法を示す。本研究では、図-4 に示すように構成相の粒子の充填を任意の粒径を有する4つの球で構成されるような構造を仮定する。この構造における空

隙は、4つの球の中心部分に内接する球とその周辺の4方向（正四面体の面方向）の3つの粒子に内接する球の2種類（図-4中の(1)および(2)）が考えられる。すなわち、4つの球粒子が任意の径（半径） $a, b, c, d$  を有する場合の内接球の半径、すなわち空隙径  $\phi_r$  をそれぞれ算定する。硬化体中に存在する  $\phi_r$  を有する球の体積が分かれば、空隙径分布を表せることになる。つまり、構成相の粒度分布から全ての粒子の個数を求め、そこから任意に4個の粒子を選び、全ての粒子の組み合わせにおける空隙径を計算し、空隙径とその体積分布の関係を求める。粒径  $r$  の全体の体積を  $V(r)$ 、粒径  $r$  の粒子一つの体積を  $v(r)$  とすると、粒子数  $n(r)$ 、構成相全体の粒子数  $N$  は式(6)となる。

$$n(r) = \frac{V(r)}{v(r)} = \left( \frac{dG(r,t)}{dr} \right) / \left( \frac{4\pi r^3}{3} \right), \quad N = \sum n(r) \quad (6)$$

$N$  個の全ての粒子から任意の4個の粒子を選ぶ組み合わせは式(7)で表される。

$${}^N C_4 = \frac{N!}{4!(N-4)!} = \frac{N(N-1)(N-2)(N-3)}{4 \times 3 \times 2 \times 1} \quad (7)$$

粒径が  $a, b, c, d$  の4つの球で囲まれた空隙径  $\phi_r$  ( $\phi_r(a,b,c,d)$ ,  $\phi_r(a,b,c)$ ,  $\phi_r(b,c,d)$ ,  $\phi_r(c,d,a)$ ,  $\phi_r(d,a,b)$ ) が発生する確率  $P_{\phi_r}$  は式(8)で表される。

$$P_{\phi_r} = \frac{n(a) \times n(b) \times n(c) \times n(d)}{{}^N C_4} = \frac{n(a) \times n(b) \times n(c) \times n(d)}{{}^N C_4} \quad (8)$$

構成相全体に占める空隙径  $\phi_r$  の割合は、空隙を球として扱うことから式(9)で表される。

$$V_{\phi_r} = P_{\phi_r} \times \frac{4\pi \phi_r^3}{3} \quad (9)$$

空隙は、水和収縮と未反応の水の体積の和として扱い、この空隙を練混ぜ時の水とセメントの体積で除した値を空隙量(ml/ml)とした。単位質量あたりの練混ぜ時の体積  $V_0$ (ml/g) は水セメント比(W/C)を  $w_0$ 、セメント密度を  $\rho_c$ (g/ml) とおくと式(10)で示され、材齢  $t$  における空隙量を  $V_p(t)$ (ml/g) とおくと空隙径分布は式(11)で示される。

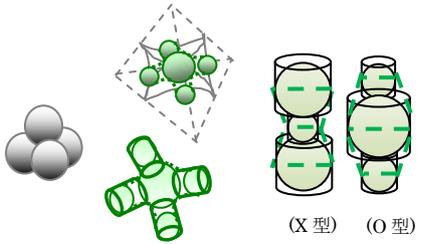
$$V_0 = \frac{1 + \rho_c w_0}{\rho_c (1 + w_0)} \quad (10)$$

$$V(\phi_r) = \frac{V_p(t)}{V_0} V_{\phi_r} \quad (11)$$

ここで、 $V_{\phi_r}$  は式(9)で求まる空隙径  $\phi_r$  の体積割合  $V_{\phi_r}$  から求めた空隙径  $\phi_r$  以下の空隙の割合である。

### 3.3 空隙構造に基づく透水係数

透水係数を算定する方法について以下に示す。空隙構造モデルでは球を仮定した粒子の充填と粒子に内接する球を空隙として捉え、全ての組み合わせにおける計算結果を積算することで空隙径分布を求めている。計算を単純にするため、空隙径分布を求める際のモデルでは空隙



(a) 4つの球の充填 (b) 4つの球に内接する間隙 (c) 連続間隙の形状 (X型) (O型)

図-5 本研究における間隙構造の概念

を球として扱っているが、実際の間隙構造はこれら空隙の球と空隙の球を連結するような円筒状の空隙が存在する。そこで、空隙に相当する円管内の流れを想定し、空隙径分布から理論的に透水係数を算定する。管内はレイノルズ数がゼロである層流条件を満たすものと仮定する。粘性流体が管径一定の円管を層流で流れる場合、その流速分布はハーゲン・ポアズイユ流れとして知られているように式(12)で表される。

$$v(r) = \frac{1}{4\mu} \left( -\frac{dp}{dz} \right) (\phi r^2 - r^2) \quad (12)$$

ここで、 $v(r)$ は流速(cm/s)であり、 $r$ は円管中心からの断面方向の距離(cm)、 $\mu$ は粘性係数(cm<sup>2</sup>/s)、 $\phi r$ は円管の半径(cm)である。また、 $-dp/dz$ は圧力勾配であり、式(13)で表わされる。

$$-\frac{dp}{dz} = \gamma_w g \frac{dH}{dz} \quad (13)$$

ここで、 $dH/dz$ は動水勾配*i*である。なお、 $\gamma_w$ は水の密度(g/cm<sup>3</sup>)、 $g$ は重力加速度(cm/s<sup>2</sup>)、 $dH$ は水頭差(cm)である。式(12)を断面内で積分すると流量  $Q$ (cm<sup>3</sup>)に関する式(14)が得られる。

$$Q = \int_0^{\phi r} 2\pi r v(r) dr = \frac{\pi \gamma_w g i}{8\mu} \phi r^4 = \frac{\pi g i}{8\nu} \phi r^4 \quad (14)$$

ここで、 $\nu$ は動粘性係数(cm<sup>2</sup>/s)である。またダルシー則より、半径  $\phi r$ の円管の透水係数  $k(\phi r)$ は、断面積  $A$ (cm<sup>2</sup>)を用いて式(15)で表される。

$$k(\phi r) = \frac{Q}{Ai} = \left( \frac{\pi g i}{8\nu} \phi r^4 \right) / (\pi \phi r^2 i) = \frac{g}{8\nu} \phi r^2 \quad (15)$$

次に、空隙径分布から透水係数を求める方法を示す。空隙径分布  $V(\phi r)$ は、空隙率を考慮した空隙径分布関数として示した。また、本研究で提案する空隙構造の概念は、図-5(a)に示すように4つの球粒子を考え、同図(b)連結した際の断面内を連続的に通る定常流れでは、流量は一定であり流速が変化するものと考えられる。すなわち、断面の平均径を代表径として扱う方法や空隙径分布で示される径ごとに式(15)に基づいて透水係数を求め、それに重みを乗じて平均的な流れとして扱う方法は、マクロな挙動を評価するには適しているが、ミクロな挙動に対

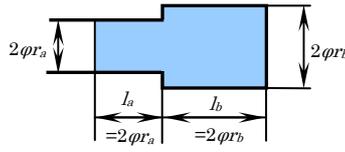


図-6 連続した2つの円筒型空隙の概念

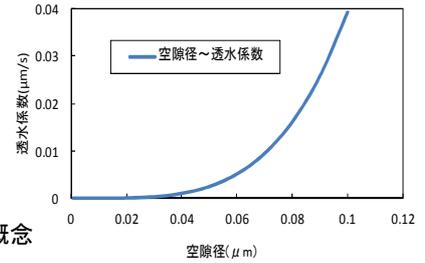


図-7 空隙径に依存させた透水係数の変化

しては、評価不可能である。

そこで、図-6に示したように2つの異なる断面における流れを考える。ここでは、Mualem-van Genuchtenモデル<sup>6)</sup>の2つの連結空隙の考え方を部分的に採用し、これを一つの断面として考え、想定される有効空隙の組み合わせを考慮することで、有効空隙径分布を有する場合の透水係数を算定する。ここで、有効空隙径分布とは、透水特性を支配する空隙径分布の事を指す。流量  $Q$ は式(14)で示され、また流量  $Q$ は断面内で一定であるので、このような2つの連結した間隙と等価な円筒型空隙の断面半径を  $\phi r'$ とくと、これらの関係は式(16)で示される。

$$Q = \frac{\pi g}{8\nu} \phi r_a^4 \frac{\Delta h_a}{l_a} = \frac{\pi g}{8\nu} \phi r_b^4 \frac{\Delta h_b}{l_b} = \frac{\pi g}{8\nu} \phi r'^4 \frac{\Delta h'}{l'} \quad (16)$$

ここでは、連続した2つの円筒型空隙全体のポテンシャル差を  $h'$ 、長さを  $l'$ とする。

また、 $\Delta h'$ は次式となる。

$$\Delta h' = \Delta h_a + \Delta h_b \quad (17)$$

式(17)を用いて、式(16)を整理すると、式(18)を得る。

$$\Delta h' = \frac{\phi r'^4 l_a}{\phi r_a^4 l'} \Delta h' + \frac{\phi r'^4 l_b}{\phi r_b^4 l'} \Delta h' \quad (18)$$

以上より、式(18)を  $\Delta h'$  で両辺を割ると最終的に、式(19)が得られる。

$$\left( \frac{l_a}{\phi r_a^4} + \frac{l_b}{\phi r_b^4} \right) \frac{\phi r'^4}{l'} = 1 \quad (19)$$

次に、半径  $\phi r'$ の円筒型空隙の体積が半径  $\phi r_a$ と  $\phi r_b$ の円筒型空隙の体積の和と等しいとすると、式(21)が与えられる。

$$\phi r'^6 = \frac{\phi r_a^2 l_a + \phi r_b^2 l_b}{\phi r_a^4 l_b + \phi r_b^4 l_a} \cdot \phi r_a^4 \cdot \phi r_b^4 \quad (20)$$

ここで、式(19)と式(20)から、式(21)が得られる。

$$\pi \phi r'^2 l' = \pi \phi r_a^2 l_a + \pi \phi r_b^2 l_b \quad (21)$$

本研究では、空隙の長さは空隙径に比例するものと仮

定すると、式(22)の関係が得られる。

$$\frac{l_a}{l_b} = \frac{\phi r_a}{\phi r_b} \quad (22)$$

式(22)を式(21)に代入して整理し、式(23)を得る。

$$\phi r'^2 = \phi r_a \cdot \phi r_b \quad (23)$$

次に、図-6 に示すように空隙径  $\phi r_a$  と  $\phi r_b$  を有する空隙が接触する確率を考える。空隙径  $\phi r$  ( $\phi r \sim \phi r + d\phi r$ ) を有する空隙が単位体積あたりに占める体積  $V_{\phi r}$  は空隙径分布  $V(\phi r)$  より、式(24)で示される。

$$V_{\phi r} = \frac{dV(\phi r)}{d\phi r} \quad (24)$$

Mualem-van Genuchten モデル<sup>6)</sup>では、体積比を乗じることによって接触確率として表現している。しかしながら、同じ体積を有しても空隙径が異なれば空隙の個数は異なり、図-6 に示す2つの空隙の組み合わせにおいても空隙の個数が影響する。

より小さな空隙径の方が同じ体積に占める個数は多くなり、他の空隙と接する確率が増加するということになる。本研究では、広い粒度分布を有する材料を扱うことから、空隙の個数と接触確率を考慮したモデルを考える。空隙径  $\phi r$  の個数  $n(\phi r)$  は、空隙径  $\phi r$  の1つあたりの体積を  $v(\phi r)$  として、式(25)で求められる。

$$n(\phi r) = \frac{V(\phi r)}{v(\phi r)} = \frac{dV(\phi r)}{d\phi r} / 2\pi\phi r^3 \quad (25)$$

また、全体の空隙の個数  $N(\phi r)$  は式(26)で示される。

$$N(\phi r) = \sum n(\phi r) \quad (26)$$

$N(\phi r)$  個の空隙の中から2個の空隙を選ぶ組み合わせは式(27)で示される。

$${}_N C_2 = \frac{N(N-1)}{2} \quad (27)$$

空隙径が  $\phi r_a$  および  $\phi r_b$  の個数をそれぞれ  $n(\phi r_a)$ 、 $n(\phi r_b)$  とおくと、それぞれこれらから1個ずつ選ぶ組み合わせとなり、 $\phi r_a$  と  $\phi r_b$  が連続する確率  $P_{\phi r_a, b}$  ( $=P_{\phi r'}$ ) は全体の個数から選ぶ組み合わせとの比で表されるから、式(28)で与えられる。

$$P_{\phi r_a, b} = P_{\phi r'} = \frac{n(a) \times n(b)}{{}_N C_2} = \frac{2 \times n(a) \times n(b)}{N(N-1)} \quad (28)$$

一方、 $\phi r_a$  と  $\phi r_b$  が連結した空隙と等価な空隙の断面半径を  $\phi r'$  とし、このような空隙における透水係数は式(15)より式(29)で与えられ、本研究条件下、若材齢での算定結果を図-7 に示す。

したがって、セメント硬化体中の有効空隙について、それぞれ組み合わせについて検討すれば、セメント硬化体の透水係数は式(30)で与えられる。

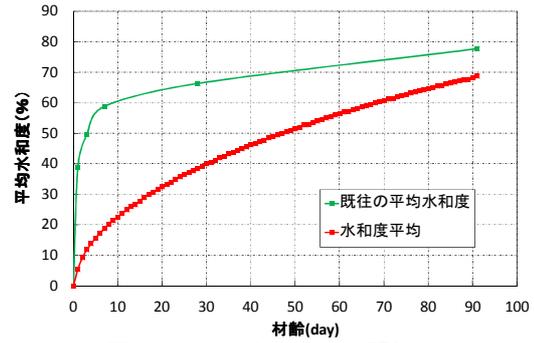


図-8 材齢と水饱和度の関係の比較

$$\bar{k}(\phi r') = \sum_{\phi r_{min}}^{\phi r_{RH}} P_{\phi r'} \cdot k(\phi r') \quad (30)$$

ここで、 $\phi r_{RH}$  は、相対湿度 RH において毛管凝縮する空隙径であり、RH=1.0(100%)では、最大空隙径  $\phi r_{MAX}$  まで考慮されることとなる。

#### 4. 本モデルの適用性の検討

本章では、本モデルの算定結果と共に既往のモデルとの比較、高温養生における実験値との比較によりその適用性について検討する。

##### 4.1 水饱和度の比較

普通ポルトランドセメントを使用し、W/C=50%としたセメントペーストにおいて若材齢、20°C水中条件下での水饱和度に関して著者らの既往のモデル<sup>5)</sup>と本モデルとの比較を行うと、図-8 のようになる。

既往の研究<sup>5)</sup>では水和反応の進行を浸透速度として議論しているものを、本研究では、実現象に即して透水速度と反応速度の二つに分類し、より実現象に立脚したモデルを構築した。既往の研究<sup>5)</sup>と比べると、材齢初期に大きな差異が見られる。本モデルでは、高温養生を行うことによりセメント粒子表面では急激に反応し、表面が緻密化しすぎて、内部への水和分拡散が阻害されることにより、セメント1粒子の平均的な水饱和度が小さくなることを表わしている。そして、材齢の経過とともに僅かな水分が内部に向かって拡散することにより、平均水饱和度が徐々に大きくなっている。

##### 4.2 細孔径分布の比較

###### 4.2.1 実験概要

本研究では、普通ポルトランドセメントを使用し、W/C=50%としたセメントペーストにおいて、80°Cの高温養生を行った際の空隙構造の算定結果について示す。水銀圧入試験を行なうためのセメントペーストの試験体は、W/C=50%になるように量りとり、攪拌した後に密閉状態で炉に入れ所定の材齢まで養生した。空隙径分布は乾燥試料を5mm角程度まで粉碎して、水銀圧入式ポ

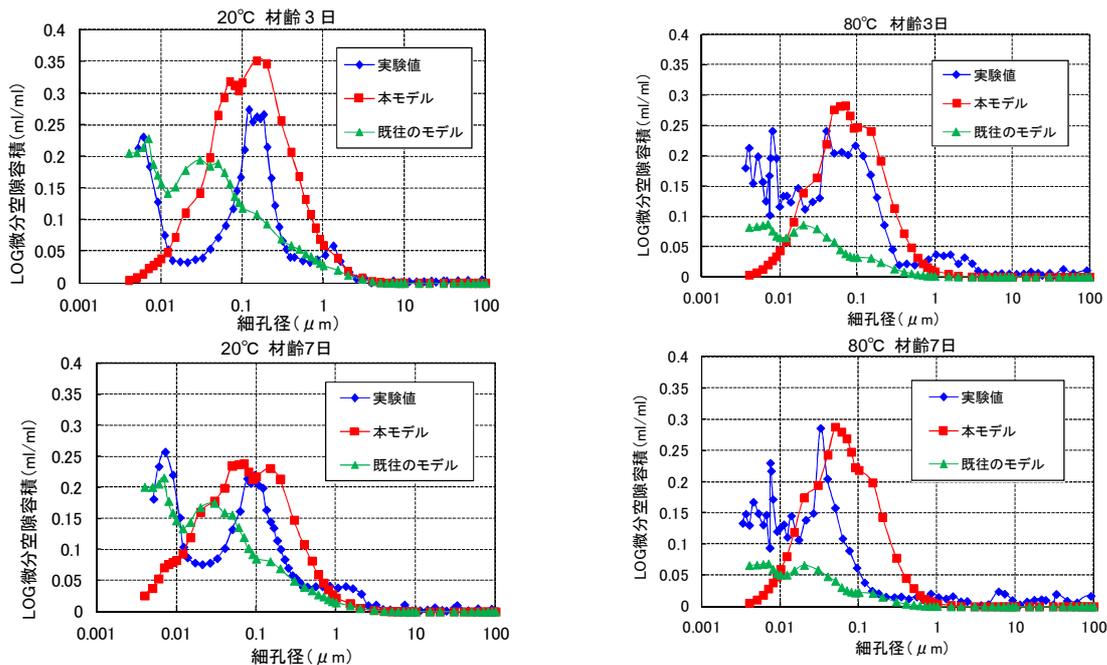


図-9 LOG 微分空隙容積の算定結果と実験値との比較

ロシメータにて測定を行った。また、水銀の表面張力を  $485 \times 10^{-3} \text{N/m}$ 、水銀の接触角を  $130^\circ$  とし、算定した。

#### 4. 2. 2 解析結果と実験結果の比較

図-9は材齢3日と7日、養生温度  $20^\circ\text{C}$  と  $80^\circ\text{C}$  における本モデルと既往のモデルによる空隙構造の算定結果と実験結果の空隙径分布を対数微分して空隙径と空隙量の関係として示している。ここで高温養生の場合、材齢7日でも十分な強度を発言し、常温に比べてもその違いは大きいと考えている。

まず、全体的な傾向として、本モデルは精度の面で、より実験値に即した結果が確認できる。

特に、 $20^\circ\text{C}$  養生の材齢7日では、空隙半径  $0.1 \mu\text{m}$  あたりにピークの一一致が見ることができた。また、 $80^\circ\text{C}$  養生のものにおいても同様に、ピークの一一致が見ることができた。しかし、細孔径が  $0.1 \mu\text{m}$  付近のピークを表現することはできたが、それ以下の部分、特に  $0.01 \mu\text{m}$  以下の微細空隙径に関しては検討が必要と考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では、著者ら<sup>5)</sup>の提案する空隙構造モデルに空隙径に依存した拡散現象と水和反応とを区別するとともに、水分量に応じた水分拡散・反応連成モデルへの拡張を検討した結果、以下の知見が見られた。

- (1) 既往の空隙構造モデル<sup>5)</sup>に空隙構造で定義された拡散と反応を区別するとともに、水分量に応じた水分の拡散・反応連成モデルへ拡張した。
- (2) 本研究において生成場所と空間配置に関しては、セメント表面から均一に生成・配置されるとしたが、

今後、重要なファクターであるため、検討を重ねる。

謝辞：本研究は、株式会社フジタ 技術センター基盤技術研究部 藤倉裕介氏からの貴重なご助言・ご指導により遂行したもので、ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) K. van Bruegel : Simulation of Hydration and Formation of Structure in Hardening Cement-Based Materials, TUDelft PhD thesis, 1991.
- 2) 石田哲也, Rajesh P. Chaube, 前川宏一：微視的機構に基づくコンクリートの自己収縮、乾燥収縮及びその複合に関する解析的検討, 土木学会論文, No. 578/V-37, pp. 111-121, 1997. 11.
- 3) 岸利治, 前川宏一：ポルトランドセメントの複合水和発熱モデル, 土木学会論文集, No. 526/V-29, pp. 97-109, 1995. 11.
- 4) R. Kondo, S. Ueda : Kinetics and Mechanism of Hydration of Cements, Proceedings of 5th International Symposium on the Chemical of Cement, Tokyo, II-4, pp. 203-248, 1968.
- 5) 藤倉裕介, 大下英吉：相組成と構成相の粒度変化に着目したセメント硬化体の空隙構造モデル, 土木学会論文集 E, Vol. 66, No. 1, pp. 38-52, 2010.
- 6) M. Th. van Genuchten : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil, Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, No. 5, 892-898, 1980.