

空隙構造の形成に及ぼす浸透速度の影響に関する研究

中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 学生会員 ○大槻浩平

株式会社フジタ 技術センター 正会員 藤倉裕介

中央大学 理工学部都市環境学科教授 工博 正会員 大下英吉

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性能の議論には、多孔質材料の空隙特性と力学的特性に強い相関があることは言うまでもない¹⁾。したがって、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いうモデルが多く提案されている。

既往の空隙構造モデルの多くは、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るわけである。

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³⁾。また、著者らのモデル²⁾もその例外ではなく、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、言わば、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²⁾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・反応連成モデルへの拡張を試みた。

2. 空隙構造モデル

著者らの空隙構造モデル²⁾の概要であるが、セメントの粒度分布、4つの鉱物組成および水和反応式を与え、水和反応モデルを用いて相組成を算定する。また、生成される各水和物に対して粒度分布の情報を与え、水和反応の進行により変化する未水和セメントの粒度分布を考慮する。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が、各鉱物の含有率に応じて平均的に球を保つように仮定し、反応深さを求め、未水和セメント粒径を算定する。

いま、水和生成物 j の粒径をセメントと同様に r とし、 $G_j(r)$ で表し、相組成の算定結果から求めた材齢 t における水和生成物 j の体積比率を $\gamma_j(t)$ とし、硬化体全体の粒度分布は、固相が水和生成物と未水和セメントで

構成されていると考えると式(1)で表わすことができる。

$$G(r, t) = \sum \gamma_j(t) G_j(r) + \gamma_c(t) \cdot G(r - x(t)) \quad (1)$$

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。

次に、式(1)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。

相組成から求まる空隙量を $V_p(t)$ とおくと空隙径分布は式(2)で示される。

$$V(\phi_r) = (V_p(t)/V_0) \cdot V_{\leq \phi_r} \quad (2)$$

ここで、 V_0 は練混ぜ時の体積であり、水セメント比を w_0 とし、セメント密度を ρ_c とおくと次式となる。

$$V_0 = (1 + \rho_c \cdot w_0) / \rho_c (1 + w_0) \quad (3)$$

ここで、 $V_{\leq \phi_r}$ は空隙径 ϕ_r の体積割合 V_{ϕ_r} ($V_{\phi_r} = P_{\phi_r} (4\pi\phi_r^3/3)$) から求めた空隙径 ϕ_r 以下の割合である。 P_{ϕ_r} は空隙径 ϕ_r が発生する確率である。

3. 水分の拡散・反応連成モデル

3. 1. 空隙構造に依存した水分移動モデル

図-1 の示すように、著者ら²⁾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。したがって図-1 に示すような高温養生では粒子表面の空隙構造が緻密になり、内部への水分移動が阻害されるといった実例の再現性に欠ける。

本章では、空隙構造を形成する細孔径に依存した拡散現象と水和反応とを独立化してモデル化を行い、そして両者を連成させた水分の拡散・反応連成モデルへの拡張を試みた。

まず、透水係数については、近藤ら⁴⁾の研究で用いられている Poiseuille の式を採用し、式(4)で示すように細孔径係数に依存させて定めた。

$$K = \pi r^4 / 8\eta \quad (4)$$

ここで、 r は細孔半径を示し、 η は液状水の粘性係数であり、内海ら⁵⁾の研究より式(5)を用いる。

$$\eta = a/bT^2 + cT + 1 \quad (5)$$

図-2 に空隙径と透水係数の関係性を示し、これに基づいて次の節では水和度を算出することとする。

キーワード：水和反応，空隙構造，浸透速度，透水係数

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部 TEL 03-3817-1892

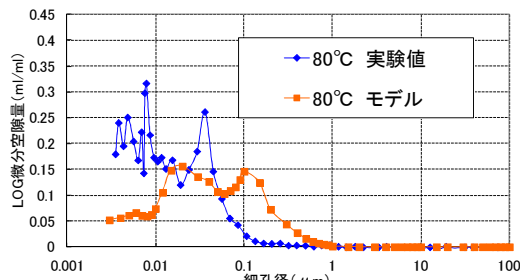
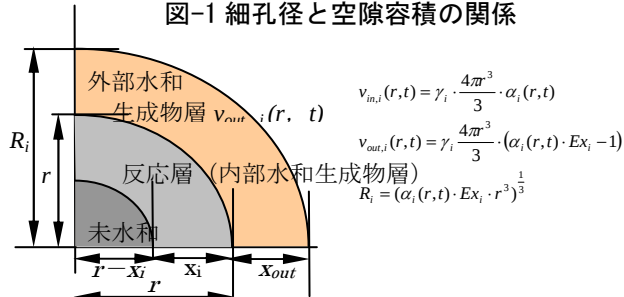


図-1 細孔径と空隙容積の関係

図-3 セメント粒子中の鉱物 i の反応概念図

3. 水和反応モデル

図-3 に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, 反応層厚さを $x_{i,t}(\mu\text{m})$ とすると式(6)で示される.

$$\alpha_i(r, t) = 1 - (1 - x_{i,t}/r)^3 \quad (6)$$

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 $k_i(\mu\text{m/h})$ と算定ステップの時間間隔 $\Delta t(\text{h})$ の積の総和として式(7)で表される.

$$x_i(t) = \sum_0^t k_i(r, t) \cdot \Delta t \quad (7)$$

著者ら²⁾の研究では, 鉱物 i の反応速度 $k_i(\mu\text{m/h})$ は, セメント粒子の粒径ごとに異なる水和度 $\alpha_i(r, t)$ に応じて変化するものとして式(8)で与えている.

$$k_i(r, t) = \beta_i(t) \cdot \log(1/\alpha_i(r, t)) \quad (8)$$

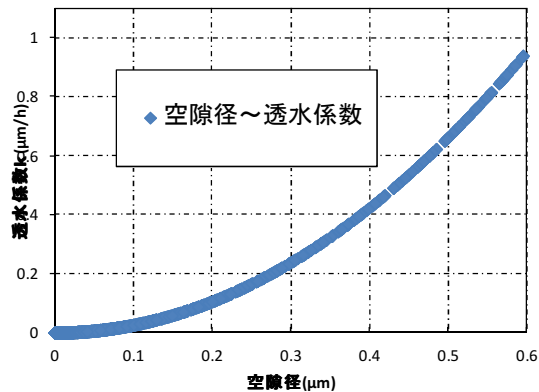
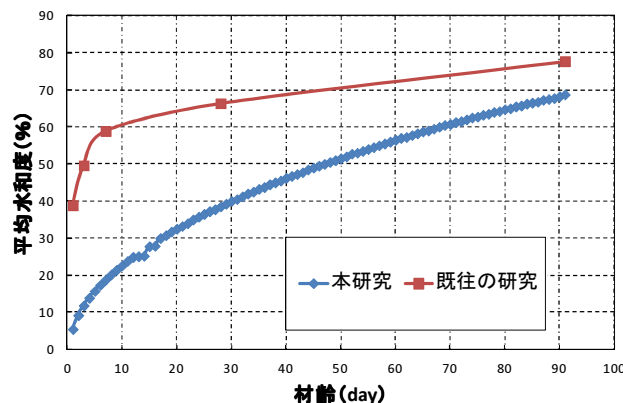
4. 本モデルにおける水和度

本研究の透水係数を適用し, 水和度の計算を行い, 著者らの既往のモデル²⁾との比較を行うと, 図-4 のようになる.

著者らの既往の研究²⁾では反応速度として議論しているものを, 本研究では, 浸透速度として, 透水速度と反応速度と二つに分け, より実現象に立脚したモデルを構築した. 著者らの既往の研究²⁾と比べると, 材齢初期に大きな差異が見られる. これは, 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するから表面が緻密化しすぎて, 内部への水と分拡散が阻害されることにより, セメント1粒子の平均的な水和度が小さくなるという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, 平均水和度が徐々に大きくなっていく.

5. まとめ

本研究では, 著者ら²⁾の提案する空隙構造モデルに

図-2 透水係数 k と空隙径 ϕ_r の関係図-4 材齢と水和度 $\alpha_{[t, r]}$ の関係の比較

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) 飽和流れを仮定して, 空隙径に依存させた透水係数を用いたことにより, 著者らの既往の研究と比べると, 材齢初期に大きな差異が見られた. 今後, 不飽和流れの考慮等に加え, 更なる実現象に立脚したモデルの構築を目指す.
- (2) 本研究において硬化体全体としての空隙径分布を求める場合, セメントや水和生成物の位置が限定されるため, 著者らの既往のモデルのようにランダムな配置で確率的に求めるのではなく, 他の手法が必要になる. 今後, マクロな物性である空隙径分布, 水和生成物量等との比較において検討を重ねる.

参考文献

- 1) 伊代田岳史, 魚本健人: 若材齢における乾燥がセメント硬化体の内部組織構造に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.732/V-59, pp.17-26, 2003.
- 2) 藤倉裕介, 大下英吉: セメント硬化体の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, pp. 38-52, 2010.
- 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) 内海秀幸: 新たな水蒸気吸着等温関係式に基づくセメント硬化体内の水分の拡散係数に対する数理表現式, 土木学会論文集E2 (材料・コンクリート構造), 374-383, 2011.
- 5) 近藤連一, 植田俊朗: セメントの水和反応の機構と速度, 第5回国際セメント化学シンポジウムにおける主論文, セメント・コンクリート No. 268-269.