

空隙構造を考慮した水分拡散・反応連成モデルに関する研究

中央大学 学生会員 ○大槻 浩平

中央大学 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物性の説明を試みるモデルが多く提案されている。

しかしながら、既往の空隙構造モデルの多くは、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。

また、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、空隙構造に依存した拡散と反応を同時に評価可能とする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¹⁾に空隙構造で定義された拡散現象と水和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. 空隙構造算定モデル

2. 1 水和反応モデルの拡張

本研究では、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、反応により細孔構造が密になれば内部への水分移動が抑制される。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¹⁾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。

2. 2 相組成および空隙構造

著者らの提案する空隙構造モデル¹⁾の概要を示す。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。

水和生成物 j の粒径を r として硬化体全体の粒度分布 $G_j(r)$ 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 $\gamma_j(t)$ を使い、式(1)に示す。

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

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。本モデルでは粒度情報から各粒径ごとに粒子数を求め、粒子の充填空隙を粒子に内接する球として考え、全ての構成粒子の接触確率を考慮することで空隙径分布を算定する。相組成から求まる空隙量を $V_p(t)$ (ml/g)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 (ml/g)は単位質量あたりの練混ぜ時の体積であり、 $V_{\leq \phi_r}$ は空隙径 ϕ_r の体積割合 V_{ϕ_r} 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 の発生確率である。

2. 3 空隙構造に基づく透水係数

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。粘性流体が管径一定の円管を層流で流れる場合、その流速分布は式(3)で表される。

$$v(r) = \frac{1}{4\mu} \left(-\frac{dp}{dz} \right) (\phi_r^2 - r^2) \quad (3)$$

$$-\frac{dp}{dz} = \gamma_w g \frac{dH}{dz} \quad (4)$$

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)、 μ は粘性係数(cm²/s)、 ϕ_r は円

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

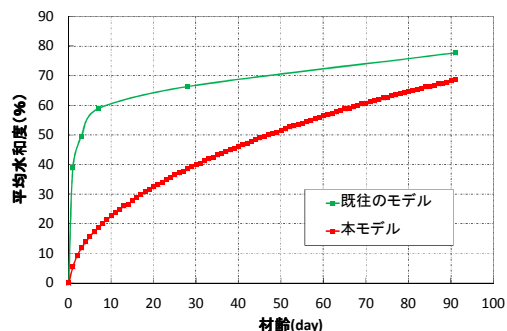


図1 材齢と水和度の関係の比較

管の半径(cm)である

. また, $-dp/dz$ は圧力勾配であり, 式(4) で表わされ, dH/dz は動水勾配 i である. なお, γ_w は水の密度(g/cm^3), g は重力加速度(cm/s^2), dH は水頭差(cm)である. 式(4)を断面内で積分すると流量 $Q(cm^3)$ に関する式(5)が得られる.

$$Q = \int_0^{\phi_r} 2\pi r v(r) dr = \frac{\pi \gamma_w g i}{8\mu} \phi_r^4 = \frac{\pi g i}{8\nu} \phi_r^4 \quad (5)$$

ここで, ν は動粘性係数 (cm^2/s)である. またダルシー則より, 半径 ϕ_r の円管の透水係数 $k(\phi_r)$ は, 式(6)で表される.

$$k(\phi_r) = \frac{Q}{Ai} = \left(\frac{\pi g i}{8\nu} \phi_r^4 \right) / (\pi \phi_r^2 i) = \frac{g}{8\nu} \phi_r^2 \quad (6)$$

3. 本モデルの適用性の検討

3. 1 水和度の比較

水和度に関して著者らの既往のモデル¹⁾と本モデルとの比較を行った結果を, 図1に示す.

既往の研究¹⁾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る傾向にある.

3. 2 細孔径分布の比較

(1) 実験概要

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, $80^\circ C$ の高温養生と比較のため $20^\circ C$ 養生を行った. 空隙径分布は乾燥試料を $5mm$ 角程度まで粉砕し, 水銀圧入式ポロシメータにて測定を行った.

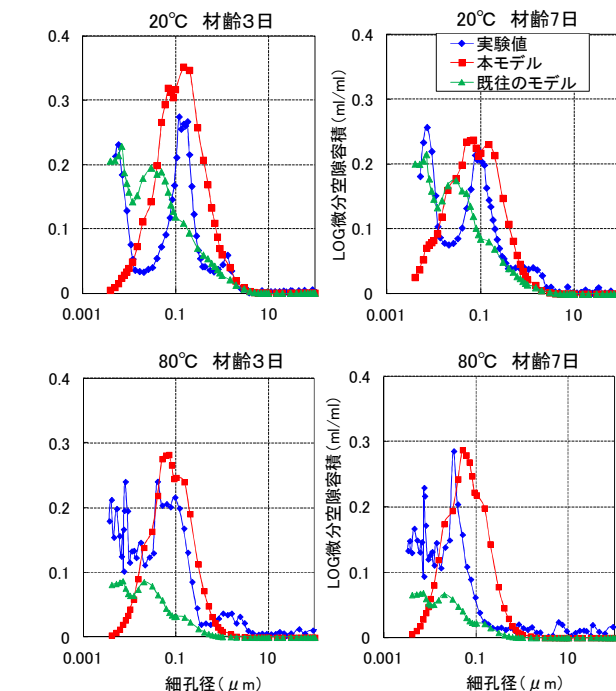


図2 LOG 微分空隙容積の算定結果と実験値との比較
(2) 解析結果と実験結果の比較

図2に材齢3日と7日, 養生温度 $20^\circ C$ と $80^\circ C$ における本モデル, 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す.

まず, 全体的な傾向として, 本モデルは既往のモデルと比較すると精度の面で, より実験値に即した結果が確認できる.

特に, $20^\circ C$ 養生の材齢7日では, 空隙半径 $0.1 \mu m$ あたりにピークの一致が見ることができた. また, $80^\circ C$ 養生のものにおいても同様に, ピークの一致を見ることができた.

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す.

- (1) 水和度比較では, 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.
- (2) 空隙径分布の比較では, 比較的精度よく実験値に即した結果が確認でき, 特にピークの一致も見ることができた.

【参考文献】

- 1) 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)
- セメントの種類と水和に関する研究, セメント・コンクリート, No.580, pp.23-29 (1996)