セメント硬化体中の水分移動に関する温度勾配と含水率勾配の

相互作用に関する検討

千葉工業大学	学生会員	○長尾	匠
千葉工業大学	正会員	内海	秀幸

1. はじめに

セメント硬化体のような多孔質体内部の水分移動は含水率 勾配や温度勾配を駆動力とした複雑な現象である.本研究で は,不飽和状態,かつ,非等温下でのセメント硬化体を対象 とし,著者らの一人が提案した吸着等温線モデル¹⁾を用いて 定式化された拡散係数を利用し,温度勾配と含水率勾配のそ れぞれを駆動力とする水分移動の相互作用に関する基礎的検 討を行う.

2. 拡散係数の表現

拡散係数(*D*_{Tvap}, *D*_{θvap}, *D*_{Tliq}, *D*_{θliq})を本研究ではそれぞれ次 式のように取り扱う.

[含水率勾配に由来した拡散係数]

$$D_{\theta vap} = \alpha_1 D_v \frac{p_{sat}}{R_w T} \left(\frac{\theta_0 - \theta_w}{\rho_L}\right) \frac{\partial H_r}{\partial \theta_w}$$
(1)

$$D_{\theta liq} = \beta_1 \frac{k}{g} \frac{\partial p_c}{\partial \theta_w}$$
(2)

[温度勾配に由来した拡散係数]

$$D_{Tvap} = D_{\nu} \frac{H_r}{\rho_L} \left(\frac{\theta_0 - \theta_{\nu}}{\rho_L}\right) \frac{d\rho_{\nu s}}{dT}$$
(3)

$$D_{Tliq} = k \frac{1}{\Phi_w} \left| \frac{d\Phi_w}{dT} \right| h \tag{4}$$

ここで, D_{Tliq} [m²s⁻¹K⁻¹]は温度勾配を駆動力とした液相水の 拡散係数, $D_{\theta liq}$ [m²s⁻¹K⁻¹]は含水率勾配を駆動力とした液相水の 拡散係数. また, D_{Tvap} [m²s⁻¹K⁻¹]は温度勾配を駆動力とした蒸 気相水の拡散係数, $D_{\theta vap}$ [m²s⁻¹]は含水率勾配を駆動力とした 蒸気相水の拡散係数である. さらに, Tは絶対温度[K], θ_0 は 体積基準の飽和水分量[kg m⁻³], p_c は毛管圧[N m⁻²], Hrは相対 湿度[-], hは圧力水頭[m], R_w は水分基準のガス定数(461.51[J kg⁻¹K⁻¹]), ρ_{vs} は水の飽和蒸気密度[kg m⁻³], p_{sat} は水の飽和蒸気 圧[N m⁻²], kは飽和透水係数[m s⁻¹], gは重力加速度[m s⁻²], Φ_w は水の界面張力[N m⁻¹]である.なお, D_v は蒸気相水の大気 中での拡散係数[m²s⁻¹]であり, $\alpha_l \ge \beta_l$ はそれぞれ無次元の係 数である.

式(1), (2)に関する拡散係数は Daian の定式化²⁾を参考に文 献 3)で示した式を採用しており,式(3), (4)については Philip

キーワード セメント硬化体, 拡散係数, 不飽和, 非等温, 吸着等温線

and de vries の定式化 ^{4), 5)}に倣い定式化されており,式中の ∂H_r / $\partial \theta_w$, $\partial p_c / \partial \theta_w$, h, Hrは文献 1)の吸着等温線モデルを用いる ことにより代数表現することが可能である.

3. 数値計算モデルとパラメータ設定

温度勾配と含水率勾配の両方を考慮した場合の支配方程式 は式(5)のように表される.また,温度勾配のみを考慮した場 合の支配方程式は式(6)のように表される.

$$\frac{\partial \theta_{w}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left[D_{Tliq} \rho_{L} + D_{Tvap} \rho_{v} \right] \frac{\partial T}{\partial x} + \left[D_{\theta liq} + D_{\theta vap} \right] \frac{\partial \theta_{w}}{\partial x} \right\}$$
(5)

$$\frac{\partial \theta_{w}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left[D_{Tliq} \rho_{L} + D_{Tvap} \rho_{v} \right] \frac{\partial T}{\partial x} \right\}$$
(6)

図-1 に計算モデルを示す. モデルは全長 *L*=1.0[m]のセメン ト硬化体のスラブを想定し,水平方向に 1 次元とした. 節点 数 *n* は 201,要素数 *E* は 200 と設定した. 一要素当たりの長 さは 0.005[m]となる.

境界条件,初期条件および温度条件を(7)~(9)に示す. (境界条件)

$$\theta_{w} = 50[\text{kg} / \text{m}^{3}] \begin{cases} x = 0, \ t \ge 0\\ x = L, \ t \ge 0 \end{cases}$$
(7)

(初期条件)

 $\theta_{w} = 50[\text{kg}/\text{m}^{3}]; \ 0 \le x \le L, \ t = 0$ (8)

(温度条件)

$$T = 10[^{\circ}C] + 70[^{\circ}C]\sin(\frac{\pi(n-1)}{E}) = 0 ; (t \ge 0)$$
(9)

数値計算法は直接代入法を用いた差分法を用いた.時間 ステップ(Δt)ならびに各時間ステップにおける収束計算回数 は計算結果の安定を確認したうえで $\Delta t = 50[s]$ ならびに最大 20 回とした.



連絡先 〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1 千葉工業大学 大学院 建築都市環境学専攻 TEL047-478-0447

なお,計算する際に必要となる *a*₁に相当する係数は 0.1~ 0.3 程度, *β*₁については 0.001~0.004 の値が用いられており, ここでは α₁=0.3, *β*₁=0.004 と設定した。

4. 数値計算結果

V-49

図-3 に数値計算結果を示す. 図中,赤の実線は式(5)の結果 を表現しており,青の実線は式(6)の結果である.

図-3より,式(5)ならびに式(6)の結果ともに,含水率分布は 下に凸型の形状を示した.このような傾向は,温度条件とし て両端の温度が低く,中央部において高い温度となっている ことから (図-2 参照),温度の高い中央部の水分が温度の低 い端部に移動する現象を表現しているものと考えられる.

式(5)と式(6)の結果を比較した場合,式(5)の結果,すなわち, 温度勾配ならびに含水率勾配の双方の水分移動に関する駆動 力を考慮した方が,式(6)の温度勾配のみを駆動力とした場合 の結果に比較して含水率の分布が全体的に高くなる傾向を示 している.このような傾向は,温度勾配を駆動力として生じ る水分移動によって形成される含水率分布と,その含水率分 布によって生じる水分移動の方向は,本計算条件では逆方向 であることに起因しているものと推察される.

5. まとめ

温度勾配と含水率勾配の双方を考慮した場合と温度勾配の みを考慮した場合での数値計算を比較することにより、それ らの水分移動の相互作用について検討した.所定の温度分布 を与えた場合(図-2 参照)、含水率分布はいずれも下に凸の形 状を示したが、双方の駆動力を考慮した結果の方が温度勾配 のみを駆動力として考慮した結果より含水率分布が全体的に 高くなる傾向が把握されたことにより、それぞれを駆動力と する水分移動の相互作用に関する基礎的な特性が確認できた.





参考文献

- 内海秀幸:セメント硬化体の水蒸気吸着等温関係式,土
 木学会論文集 E, Vol. 64, No. 4, pp. 560-571, Oct. 2008
- Daian, J. F.: Condensation and isothermal water transfer in cement mortar Part I — Pore size distribution, equilibrium water condensation and imbibition, Transport in Porous Media, Vol. 3, pp. 563-589, Dec. 1988
- 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水分の拡散係数に対する数理表現式, コンクリート工学論文集 Vol.20, No.2, pp39-49, May 2009
- Philip, J. R. and De Vries, D. A. : Moisture movement in porous materials under temperature gradients, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 38, pp. 222 - 232, 1957
- De Vries, D. A. : Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media, Transactions American Geophysical Union, 39, pp. 909-916, 1958