

## 吸着等温線モデルを利用した不飽和セメント硬化体中の水分移動則の表現

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

セメント硬化体は多孔質構造であり、その内部での水分移動は構造物の耐久性の観点から重要な現象である。そこで本研究では、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た水分移動に対する数値解析に寄与することを目的とし、含水率勾配ならびに温度勾配を駆動力とした液相水ならびに蒸気相水に対する計 4 つの拡散係数の表現式を、著者らの一人が既往の研究で提案した吸着等温線モデル<sup>1)</sup>を用いて表現する。温度勾配を駆動力とした場合の拡散係数については Philip and de Vries の定式化<sup>2),3)</sup>を基礎とし、含水率勾配を駆動力とした場合については Daian の定式化<sup>4)</sup>を基礎として文献 5) で示された定式化を採用する。用いる吸着等温線モデル<sup>1)</sup>は、セメント硬化体内部での水分量を表現する熱力学状態方程式に基づいて定式化されており、かつ、セメント硬化体固有の微細構造特性を表現可能なモデル<sup>6)</sup>となっていることから、含水率、温度ならびに空隙径分布、空隙容量等の特性についても拡散係数に反映して表現することが可能となっている。

## 2. 水分移動のフラックスと基礎式

蒸気相水のフラックス  $J_{vap}$  [ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ] は、温度勾配ならびに含水率勾配を考慮した場合、次式のように表される。

$$J_{vap} = -D_{T_{vap}} \rho_v \frac{\partial T}{\partial x} - D_{\theta_{vap}} \frac{\partial \theta_w}{\partial x} \quad (1)$$

ここで、 $D_{T_{vap}}$  [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ ] は温度勾配を駆動力とした蒸気相水の拡散係数、 $D_{\theta_{vap}}$  [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ] 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。また、 $\rho_v$  は水蒸気の密度 [ $\text{kg m}^{-3}$ ]、 $T$  は絶対温度 [ $\text{K}$ ]、 $\theta_w$  はセメント硬化体の含水率であり、本研究では単位体積当たりに含まれる水分量 [ $\text{kg m}^{-3}$ ] として表現している。液相水のフラックス  $J_{liq}$  [ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ] についても、式(1)と同様、温度勾配ならびに含水率勾配に依存した形式として次式のように表現することができる。

$$J_{liq} = -D_{T_{liq}} \rho_L \frac{\partial T}{\partial x} - D_{\theta_{liq}} \frac{\partial \theta_w}{\partial x} \quad (2)$$

ここで、 $D_{T_{liq}}$  [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ ] は温度勾配を駆動力とした液相水の拡散係数、 $D_{\theta_{liq}}$  [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ] は含水率を駆動力とした液相水の拡散係数であり、 $\rho_L$  は液相水の密度 [ $\text{kg m}^{-3}$ ] である。

式(1)と(2)を保存則に代入することにより、4 つの水分移動則を考慮した熱水分同時移動方程式が次式のように得られる。

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ [D_{T_{liq}} \rho_L + D_{T_{vap}} \rho_v] \frac{\partial T}{\partial x} + [D_{\theta_{liq}} + D_{\theta_{vap}}] \frac{\partial \theta_w}{\partial x} \right\} \quad (3)$$

## 3. 拡散係数の表現

拡散係数 ( $D_{T_{vap}}$ ,  $D_{\theta_{vap}}$ ,  $D_{T_{liq}}$ ,  $D_{\theta_{liq}}$ ) 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]

$$D_{\theta_{vap}} = \alpha_1 D_v \frac{p_{sat}}{R_w T} \left( \frac{\theta_0 - \theta_w}{\rho_L} \right) \frac{\partial H_r}{\partial \theta_w} \quad (4)$$

$$D_{\theta_{liq}} = \beta_1 \frac{k}{g} \frac{\partial p_c}{\partial \theta_w} \quad (5)$$

[温度勾配に由来した拡散係数]

$$D_{T_{vap}} = \alpha_2 D_v \frac{H_r}{\rho_L} \left( \frac{\theta_0 - \theta_w}{\rho_L} \right) \frac{d \rho_{vs}}{dT} \quad (6)$$

$$D_{T_{liq}} = \beta_2 k \frac{1}{\Phi_w} \left| \frac{d \Phi_w}{dT} \right| h \quad (7)$$

式(4)、(5)に関する定式化は文献 5) に詳細に記載されている。式(6)については文献 3)、また、式(7)については文献 2) に示された式と等価である。ここで、 $\theta_0$  は体積基準の飽和水分量 [ $\text{kg m}^{-3}$ ] であり、セメント硬化体の全空隙容量に相当する。 $p_c$  は毛管圧 [ $\text{N m}^{-2}$ ]、 $H_r$  は相対湿度 [-]、 $h$  は圧力水頭 [ $\text{m}$ ]、 $R_w$  は水分基準のガス定数 ( $461.51 [\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$ )、 $\rho_{vs}$  は水の飽和蒸気密度 [ $\text{kg m}^{-3}$ ]、 $p_{sat}$  は水の飽和蒸気圧 [ $\text{N m}^{-2}$ ]、 $k$  は飽和透水係数 [ $\text{m s}^{-1}$ ]、 $g$  は重力加

キーワード セメント硬化体、拡散係数、含水率勾配、温度勾配、吸着等温線、熱水分同時移動

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

速度 $[m\ s^{-2}]$ ,  $\Phi_w$ は水の界面張力 $[N\ m^{-1}]$ である. また,  $D_v$ は蒸気相水の気中での拡散係数 $[m^2\ s^{-1}]$ であり,  $\alpha_1$ と $\alpha_2$ ならびに $\beta_1$ と $\beta_2$ はそれぞれ無次元の係数である.

#### 4. 吸着等温線モデル

式(4)~式(7)の拡散係数に含まれる微分表現 $\partial p_c/\partial \theta_w$ や $\partial H_r/\partial \theta_w$ , ならびに,  $h$ (圧力水頭),  $H_r$ (相対湿度)は水蒸気吸着試験より得られる吸着等温線, すなわち, 相対湿度に平衡して定まる含水量との関係より表現することができる. そこで, 本研究では次式で示す吸着等温線モデル<sup>1)</sup>を用いてそれらを表現する.

$$\theta_w = \frac{\Omega \theta_0}{\Omega - \ln(H_r)} \quad (8)$$

式(8)における $\Omega$ は, 空隙径分布ならびに吸着質種, 温度にかかわる無次元定数であり次式のように表わされる.

$$\Omega = \frac{M_L}{\rho_L U R T} \quad (9)$$

式(9)における $U$ は $[m^3/J]$ なる次元を有し, 空隙径分布にかかわる定数,  $M_L$ は水の分子量 $(18.015 \times 10^{-3} [kg\ mol^{-1}])$ ,  $R$ はモル質量基準のガス定数 $(8.3143 [J\ mol^{-1}\ K^{-1}])$ である.

#### 5. 計算例

式(4)~(7)で表現された4つの拡散係数( $D_{Tvap}$ ,  $D_{\theta vap}$ ,  $D_{Tliq}$ ,  $D_{\theta liq}$ )に対する計算例を示す際に用いるパラメータの設定について述べる. $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ と $\beta_1$ ,  $\beta_2$ は材料の微細構造特性を反映したものであり, 屈曲度や連結度, また, それぞれの相の水分移動の割合を定める定数である. 既往の研究において $\alpha_1$ に相当する係数は0.1~0.3程度,  $\beta_1$ については0.001~0.004の値が用いられており, 本研究では $\alpha_1=0.1$ ,  $\beta_1=0.001$ と定めることとした. ただし,  $\alpha_2$ ならびに $\beta_2$ については, 現時点で客観的に定める情報が不足しているため, 本研究では, ともに $\alpha_2=1.0$ ,  $\beta_2=1.0$ と設定することとした. コンクリートの透水係数 $k$ は概ね $10^{-13} [m\ s^{-1}]$ のオーダーであり, また, 拡散係数については一般的に $10^{-11} \sim 10^{-8} [m^2\ s^{-1}]$ の範囲にあることを勘案して, 固有透過係数 $K [m^2]$ は $K=1.0 \times 10^{-20} [m^2]$ と設定した. 吸着等温線モデルの $\Omega [-]$ に含まれる定数 $U$ は(式(9)参照), コンクリートを対象とした場合, 概ね $U=5.0 \times 10^{-9} \sim 5.0 \times 10^{-8}$ 程度であることから $U=1.0 \times 10^{-8} [m^3/J]$ とした. さらに, 一般的なコンクリートの空隙率は概ね10~15[%]程度であることから, 完全飽和時における水分量については空隙率が10[%]に相当する $\theta_0=100 [kg\ m^{-3}]$ とした.

図-1に, 式(6), (7)により計算された温度勾配に由来した拡散係数の結果を示す. 拡散係数 $D_{Tvap}$ は, 凸型のプロファイル示しており,  $D_{Tliq}$ は含水率の増加にともなって増加する傾向を示す. また,  $D_{Tliq}+D_{Tvap}$ は $D_{Tliq}$ と同様に含水率の増加にともなって増加する傾向を示すものとなった.

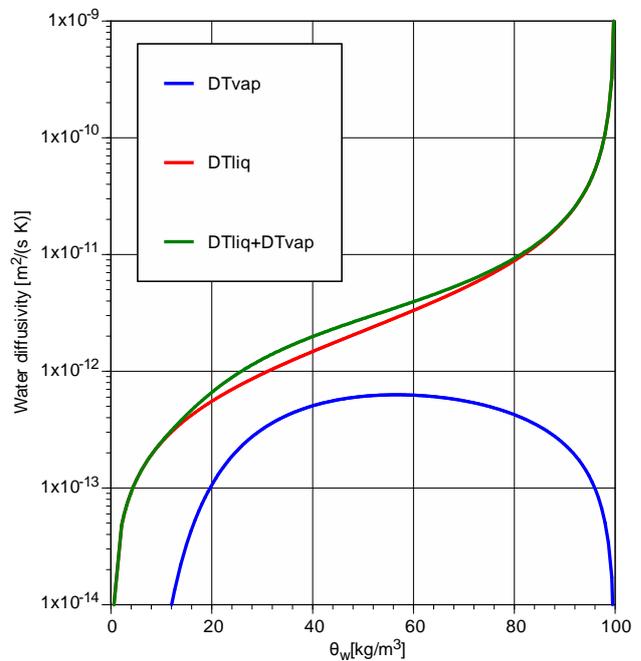


図-1 温度勾配を駆動力とした含水率と拡散係数の関係 (20[°C])

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) De Vries, D. A. : Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media, Transactions American Geophysical Union, 39, pp. 909-916, 1958
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 内海秀幸 : セメント系材料の水銀圧入試験における圧入過程の定式化と微細構造特性の評価, 土木学会論文集 E, Vol. 63, No. 4, pp.656-666, Dec. 2007