

コンクリート中の水分移動解析に関する研究

岐阜大学工学部 学生会員 ○竈橋 忍
正会員 森本 博昭

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮は、コンクリート内の水分移動による含水量（状態）の変化を伴って進行する。このため、コンクリートの含水量と乾燥収縮ひずみ量は、密接に関連している。一方、コンクリート中の空隙の湿度（蒸気圧）は、周囲の含水量と平衡状態にあると考えられる。このことから、コンクリート中の蒸気圧分布を解析することにより、コンクリート中に発生している乾燥収縮ひずみの分布を推定することが可能であると考えられる。本研究は、コンクリート中の水分移動に伴う蒸気圧分布の解析法の定式化を行うとともに、小型供試体に対する解析結果と実測値を示し、本手法の適用性を検証したものである。

2. 水分移動解析の定式化

(1) 湿気移動則

図-1を参照して、コンクリート中の水分（湿気）の移動強さ $J(g/h)$ について次式を仮定する。

$$J = -\lambda S \frac{dP}{dx} \quad \dots (1) \quad \lambda: \text{透湿率}(g/h \cdot m \cdot mmHg) \quad , \quad S: \text{湿流と直角な面積}(m^2) \\ P: \text{水蒸気圧}(mmHg)$$

ここで、物質空隙間水蒸気圧 P と空隙周囲の物質湿気密度 q とは平衡状態にあり、 P と q :湿気密度(g/m^3)は物質固有の一対一の関係が存在していると仮定すると次式が成立する。

$$J = KS \frac{dq}{dx} \quad \dots (2) \quad K: \text{湿気拡散率}(m^2/h)$$

(1)(2)式より、透湿率 λ と湿気拡散率 K の間には次の関係がある。

$$K = \lambda \frac{dP}{dq} \quad \dots (3)$$

(2) 水分移動解析の定式化

図-2に示すように、物体内の微小な立方体($dx \cdot dy \cdot dz$)の x 方向についての水分収支から次式を得る。

$$(dQx)_r = (dQx)_i - (dQx)_o = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial P}{\partial x} \right) dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad \dots (4) \\ (dQx)_i: \text{流入水分} \quad , \quad (dQx)_o: \text{流出水分} \quad , \quad (dQx)_r: \text{残留水分}$$

同様に、 y および z 方向についての残留水分を $(dQy)_r$ 、 $(dQz)_r$ とすると、時間 dt 間で微小立方体中に増加する湿気の量 $(dQ)_r$ は、 λ を一定とすると、

$$(dQ)_r = \lambda \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad \dots (5)$$

となる。一方、微小立方体の湿気密度の増加量を dq とすれば、

$$(dQ)_r = \frac{dq}{dt} dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad \dots (6)$$

(5)(6)式より、

$$\frac{dq}{dt} = \lambda \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) \quad \dots (7)$$

上式左辺において、

$$\frac{dq}{dt} = \frac{dq}{dP} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} \quad \dots (8)$$

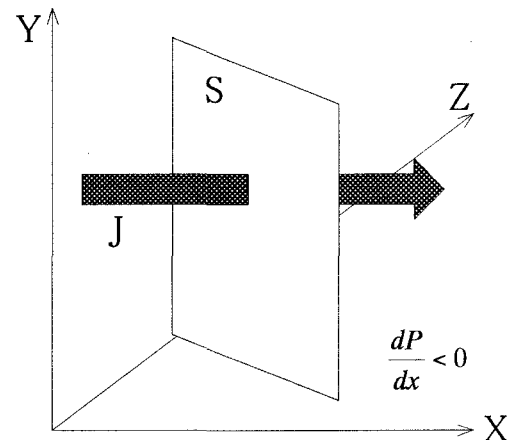


図-1 水分移動

従って、(7)(8)式より基礎微分方程式として次式が得られる。

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \lambda \frac{dP}{dq} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) = K \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) \quad \dots (9)$$

次に、水分蒸発面においては次の水分伝達境界条件を仮定することができる。

$$-\lambda \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha(P_0 - P_c)f_w \quad \dots (10)$$

α : 蒸発率($g/m^2 \cdot h \cdot mmHg$)
 P_0 : 物体表面の水蒸気圧($mmHg$)
 P_c : 周囲の水蒸気圧($mmHg$)
 f_w : 周囲の空気流動に関する係数

3. 解析および実験概要

図-3に示すように、供試体は $\phi 20 \times 15cm$ の円柱供試体を用いた。供試体側面に、上面から1cm、3cm、5cmの位置に蒸気圧計測用小孔を設けた。各供試体の上面のみを蒸発面とし、側面および底面はポリエステルフィルムおよびアルミ箔で厳重にシールを施した。供試体は、材齢1日から乾燥を開始した。小孔中の温度と湿度は、小型電気湿度計を用いて計測した。環境条件は、温度20℃、湿度45%とした。一方、蒸気圧分布解析は、有限要素法(FEM)を用いた。解析諸定数は、試行錯誤により決定した。

4. 実験結果

図-4に各小孔中の蒸気圧変化に対する実測値と解析値とを示す。図から、各小孔中の蒸気圧は乾燥後2～3日以降、表面部から順次、低下していくことがわかる。表面から1cmの位置における蒸気圧の低下は、表面から3cmおよび5cmの位置に比べて特に大きく、表面近傍では大きな蒸気圧勾配、すなわち、乾燥収縮ひずみ勾配が生じていると考えられる。解析値と実測値との対応については、解析値は表面部1cmの部分の蒸気圧低下を大きく評価する傾向にあるが、全体的には、実測値とよく合致している。

5. おわりに

本研究では、コンクリートの水分移動に伴う蒸気圧分布解析の定式化を行い、試行的な解析により本手法の実用性を確認することができた。今後は、解析諸定数の評価を当面の課題としたい。

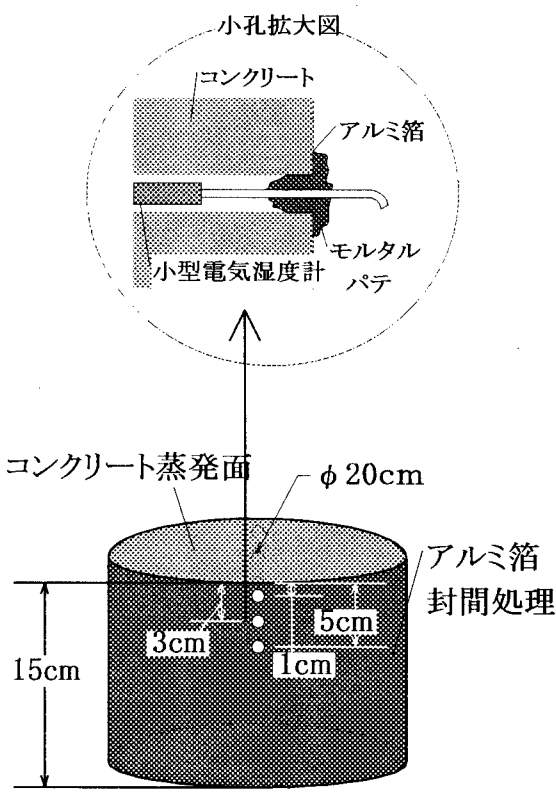


図-3 温度湿度計測用供試体

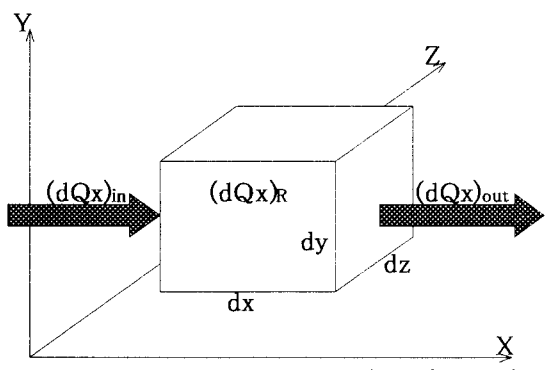


図-2 微小立方体への湿気の流入と流出

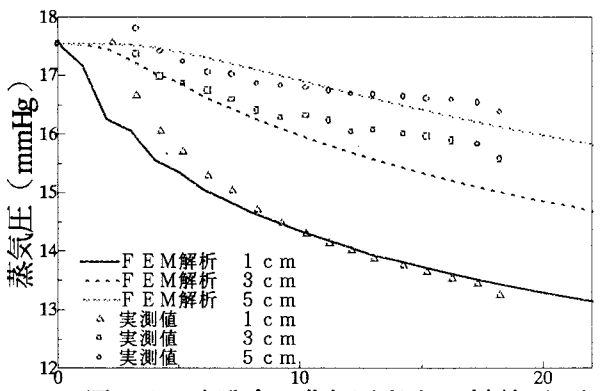


図-4 小孔中の蒸気圧変化 材齢(日)