コンクリート中の気相あるいは液相水分の移動に関する解析的研究

名古屋大学　工学部　学生会員　木全　博聖
広島大学　工学部　正会員　大下　英吉
名古屋大学　工学部　正会員　田邊　忠顕

1．はじめに

コンクリート中の水分移動のメカニズムを解明することは、乾燥収縮やクリープ、塩害やアルカリ骨材反応の進行などの予測をおこなう上で重要である。特に、水密性の問題となる海洋構造物や中性子の透過の遮断が問題となる原子炉格納容器や放射性廃棄物の地中処分などに関しては、コンクリートの透水性や含水率分布を予測することは設計上極めて重要であるため、コンクリート中の水分逸散現象に関する評価は現在まで多くおこなわれている[1]。しかし、実際のコンクリート中では拡散現象により液相が気相になったり、また気相が液相になったりという相変化が生じていることが実験的に報告されているにもかかわらず、これらの研究は主に液相移動を対象としたものである。すなわち、実現象を詳細にモデル化する際に、水分移動を液相のみで評価することは不十分であるものと考えられる。

そこで本研究では、コンクリートを固相・液相・気相の３相からなる不飽和多孔質材料としてとらえ、コンクリート中の水分移動に関するモデルの構築をおこなった。

2．コンクリート中の水分移動に関する定式化

間隙水の拡散速度$\vec{J}$は、単位体積当たりのGibbsの自由エネルギーGの勾配の関数であると仮定すると[1]、

$$\vec{J} = -\tilde{c}\nabla G \qquad (1)$$

$$\nabla G = \left\{ \frac{\partial G}{\partial x} \quad \frac{\partial G}{\partial y} \quad \frac{\partial G}{\partial z} \right\}^T$$

ここで、$\tilde{c}$はコンクリート中の浸透率を表す定数であり、これは蒸発性の水の温度とコンクリートの単位体積当たりの含水比の関数である。次に蒸発性の水が理想気体であると仮定すると、気相と液相の混相に対するGibbsの自由エネルギーGは

$$G = \frac{R}{M} T \ln H + G_{sat}(T) \qquad (2)$$

となり、また液相のみの場合のGibbsの自由エネルギーGは、

$$G = \frac{\gamma_w z + p}{\gamma_w} \qquad (3)$$

となる。ここで、Rは気体定数、Mは水の分子量、Tは絶対温度、γ_wは液体の単位体積重量、zは鉛直上向きの座標、pは間隙水圧である。また、$G_{sat}(T)$は飽和状態におけるGibbsの自由エネルギーであり、絶対温度のみの関数である。そしてHは相対湿度であり、

$$H = \frac{p_v}{p_{sat}(T)} \qquad (4)$$

と表される。ここで、p_vは気相の蒸気圧、$p_{sat}(T)$は飽和水蒸気圧を表している。

いま、温度Tが場所によらず一定である場合を考えてみよう。この場合の拡散速度$\vec{J}$は次式のようになる。

$$\vec{J} = -c\nabla H \qquad (5)$$

ここで、

$$c = \frac{R}{M} T \frac{\tilde{c}}{H} \qquad (6)$$

であり、これは浸透率を表す材料定数である。なお、cは温度Tと相対湿度Hの関数である。

次に、単位体積のコントロールボリュームを考える。単位時間当たりにコントロールボリューム内に蓄積される水分量は、質量保存の法則より、

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla^T \vec{J} \tag{7}$$

$$\nabla^T \vec{J} = \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z}$$

と表すことができる。なお、流体の蓄積量はいくつかの要因によって構成されるが[2)]、それらを考慮すると次のような質量保存則を示す式が得られる。

$$\xi\{m\}^T \frac{\partial\{\varepsilon^T\}}{\partial t} + \frac{\xi}{K_f}\frac{\partial p}{\partial t} - \nabla^T(c\nabla H) = 0 \tag{8}$$

ここで、ξは間隙率、K_fは流体の体積弾性係数、$\{\varepsilon^T\}$は全ひずみ増分である。

また、液相と気相の熱力学的平衡条件は、材料定数αを用いて次式のように表すことができる。

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \alpha\left[\frac{\partial H}{\partial x}\right]_{H=1} \tag{9}$$

最終的に節点変位$\{\bar{u}\}$、節点間隙水圧$\{\bar{p}\}$および節点相対湿度$\{\bar{H}\}$を未知数とした水分移動の支配方程式が、力の釣合い式、質量保存則および熱力学的平衡条件を連成させて次のように得られる。

$$\begin{bmatrix} [0] & [0] & [0] \\ [0] & -[H_P] & [0] \\ [0] & [0] & -[H_P'] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u} \\ \bar{p} \\ \bar{H} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_T] & -[L] & [0] \\ -[L]^T & -[S] & -[L'] \\ [0] & -[L']^T & -[S'] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dfrac{d\{\bar{u}\}}{dt} \\ \dfrac{d\{\bar{p}\}}{dt} \\ \dfrac{d\{\bar{H}\}}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dfrac{d\{f\}}{dt} \\ -d\{f_P\} \\ -d\{f_P'\} \end{Bmatrix} \tag{10}$$

ここで、$[K_T]$は接線剛性マトリクス、$[L]$は固体相の圧縮の影響に関するマトリクス、$[H_P]$は流体の移動に関するマトリクス、$[S]$は流体の圧縮性に関するマトリクス、$\{f\}$は外力ベクトル、$\{f_P\}$は流出量ベクトルである。また、$[L'][H_P'][S']$は相平衡な状態における間隙水圧と相対湿度を関係づけるマトリクスであり、$\{f_P'\}$は相平衡となる場所の相対湿度を表す。

3．実験結果に対する解析的評価

本研究では、村田[3)]による浸透深さ試験結果についての解析的評価をおこなう。この試験は、供試体に圧入した水の平均浸透深さを測定し、これと水圧の大きさおよび水圧を加えた時間との関係を求めるものである。水圧を加えた時間と平均浸透深さとの関係を示す試験結果のうち、代表的なものを表－１に示す。なお、表－１に示す実験結果に対する解析的評価は、発表当日に示す。

表－１　水圧を加えた時間と平均浸透深さとの関係

コンクリートの配合				試験時間に対する平均浸透深さ					
骨材最大寸法	水セメント比	細骨材率	材令	6時間	16時間	24時間	48時間	72時間	116時間
25mm	55%	42%	28日	1.29cm	1.82cm	2.02cm	2.42cm	2.96cm	3.05cm

参考文献

1）Bazant, Z. P. and Najjar, L. J：Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, Materiaux et Constructions, Vol.5, No.25, 1972

2）石川靖晃：飽和透水性材料としての若材令コンクリートの変形解析、名古屋大学修士論文、1993年

3）村田二郎：コンクリートの水密性の研究、土木学会論文集第77号、1961年11月