コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No. 1, 1992

論 文

[1107] 細孔構造モデルによるコンクリート中の水分移動解析

正会員○下村　匠（東京大学土木工学科）
正会員　小沢一雅（東京大学土木工学科）

1．はじめに

コンクリート構造物の品質制御の上で、内部の含水状態を予測することはきわめて重要な課題である。構造物にしばしばひびわれを生じさせる乾燥収縮は、内部の含水状態の変化による体積変化が直接の原因であり、また中性化、凍結融解、塩分浸透など構造物の耐久性能を劣化させる種々の現象の進行には含水状態が関与している。したがって、構造物の耐久性能を評価し、制御するためには、供用環境下における内部の含水状態の経時変化を予測することが必要となる。

コンクリート中の水分移動現象を特徴づけ、その取り扱いを複雑にしているのは、コンクリートの細孔や空隙などの組織構造である。そこで本研究では、コンクリートの細孔構造をモデル化し、そこでの水分の存在形態と移動を表現することにより、湿度環境下におけるコンクリート中の水分移動を解析的に予測するモデルを構築した。本モデルは、水分を液状水と水蒸気の２相に分けて扱ったこと、コンクリートの組織構造を数理的に表現したこと、水分移動現象を水分の平衡と移動とに分けてメカニズムを考察し定式化したことが特徴である。

2．細孔構造のモデル化

湿度環境下におけるコンクリートの水分移動における主要なメカニズムのひとつは、コンクリート中のセメントペースト部分に存在する微小な空間（細孔）が液状水を拘束する作用であると考えられる。本研究ではコンクリート中の細孔が持つ保水機能を数理的に表現するのに便利なように、細孔構造を以下のようにモデル化する[1]。

コンクリート中の細孔は、その壁間距離が分子レベルから可視レベルに近いものまで大きさが連続的に分布し、セメントペースト中に等方的かつ均一に存在していると考えられる。そこで細孔の半径（＝壁間距離／２）をｒとしたとき、単位体積において半径が無限小からｒまでの細孔の累積容積が、あるｒの連続関数Ｖ(ｒ)により表現できると仮定する。Ｖ(ｒ)を累積細孔容積分布関数と定義する。関数Ｖ(ｒ)の具体形として、ここでは次の形を採用する（図－１）。

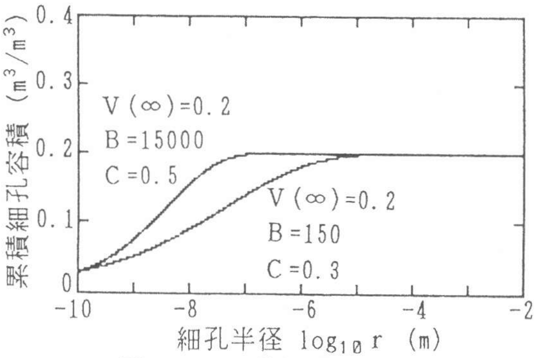
$$V(r)=V(\infty)\{1-\exp(-Br^{C})\} \tag{1}$$

ここに、ｒ：細孔半径[m]、Ｖ(ｒ)：累積細孔容積分布関数[m^3/m^3]、Ｖ(∞)：単位体積あたりにおける総細孔容積[m^3/m^3]、Ｂ、Ｃ：関数の形状を決定するパラメータである。関数Ｖ(ｒ)の具体形に関する検討は重要な課題であるが別の機会にゆずることとし、ここでは簡単のため式(1)の形を採用し、後の議論を進めることにする。また、コンクリート中の空間を構成しているのは、ここでモデル化されるセメントペースト部分の細孔だけでなく、たとえばエントラップトエアや骨材周囲の空隙など、その大きさ、形状、および水分移動現象において果たす機能が、セメントペースト部分の細孔とは著しく異なる空隙も存在していると考えられるが、細孔以外の空隙の具体的な表現については今後の課題とする。

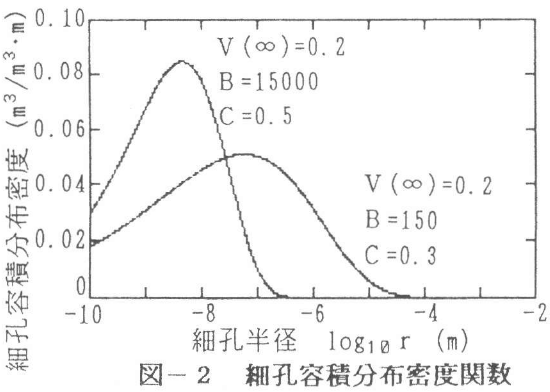
累積細孔容積分布関数V(r)を半径rで微分することにより、細孔容積分布密度関数を得る。

$$\frac{dV(r)}{dr} = V(\infty) B C r^{C-1} \exp(-B r^{C}) \tag{2}$$

ただし細孔容積は対数的に分布するため、ここでは分布密度関数を図示する際には、累積細孔容積分布関数V(r)を$\log_{10} r$で微分した曲線を用いる（図－2）。



図－1　累積細孔容積分布関数



図－2　細孔容積分布密度関数

3．細孔における水分の存在形態

壁間距離の小さい空間に存在する液状水は、毛管力により拘束されているために自由水面を有する水ほども高い水蒸気圧を示すことができない。半径rの毛管に存在する液状水と平衡する水蒸気の圧力pは次のKelvinの式で表わされる[2]。

$$\ln \frac{p}{p_0} = -\frac{2\gamma M}{R T \rho} \frac{1}{r} \tag{3}$$

ここに、p：水蒸気の圧力[Pa]、p_0：温度Tにおける飽和水蒸気圧[Pa]、γ：温度Tにおける水の表面張力[N/m]、M：水の分子量[kg/mol]、R：気体定数[J/mol·K]、T：絶対温度[K]、ρ：液状水の密度[kg/m³]、r：毛管半径（＝液面の曲率半径）[m]である。

本研究では式(3)で表わされる関係が、コンクリート中のセメントペーストの細孔に存在する液状水と水蒸気にも適用できるものとする。すなわちコンクリートが、温度T、相対湿度p/p_0のもとで平衡状態にある場合、その細孔組織中では次式(4)をみたす曲率半径r_Sを有する界面が、半径がr_Sの細孔に形成されているとする。

$$r_S = -\frac{2\gamma M}{R T \rho} \left(\ln \frac{p}{p_0}\right)^{-1} \tag{4}$$

平衡状態においては半径がr_Sより小さい細孔はすべて液状水によりみたされ、半径がr_Sより大きい細孔はすべて圧力pの水蒸気によりみたされていると仮定する。つまりr_Sを、液状水が存在する最大細孔半径であるとする。そこでいま式(1)によりコンクリートの累積細孔容積分布を表現すれば、単位体積あたりに存在する液状水量w_L[kg/m³]と、単位体積あたりの細孔において水蒸気の占める体積V_G[m³/m³]は、累積細孔容積分布関数の定義にしたがい、次式(5),(6)によって表わすことができる（図－3）。

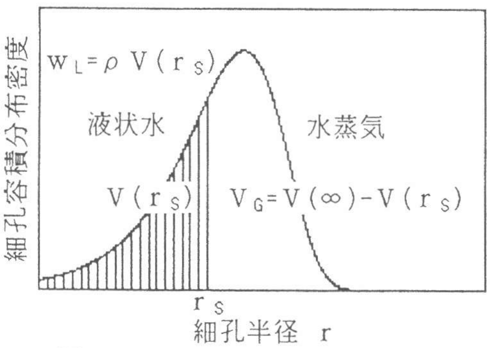
$$w_L = \rho \int_0^{r_S} \frac{dV(r)}{dr} dr = \rho V(r_S) \tag{5}$$

$$V_G = \int_{r_S}^{\infty} \frac{dV(r)}{dr} dr = V(\infty) - V(r_S) \tag{6}$$

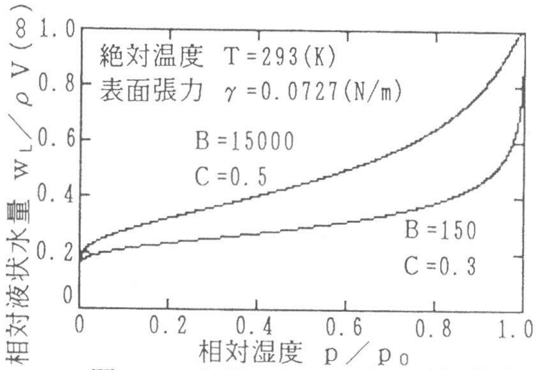
また水蒸気が理想気体であると仮定すれば、単位体積あたりに存在する水蒸気量をw_G[kg/m^3]あるいは水蒸気濃度（密度）をρ_G[kg/m^3]として次の状態方程式が成立する。

$$p V_G = \frac{w_G}{M} RT \quad \text{あるいは} \quad p = \frac{\rho_G RT}{M} \quad (\text{ただし}\ \rho_G = \frac{w_G}{V_G}) \tag{7}$$

式(4),(5),(6),(7)によりコンクリート中の細孔における液状水量と相対湿度の平衡関係が規定される。本モデルは、液状水の存在する最大細孔半径を介して平衡関係を記述することにより、液状水と水蒸気の間の量的な関係だけでなく、それぞれの存在場所をも表現していること、および温度を状態変数として取り入れていることが特徴である。平衡特性と式(1)で表わされる累積細孔容積分布関数は1対1に対応し、関数の形状を決定するパラメータB、Cを変化させると平衡特性が変化する（図－4）。



図－３　細孔中の水蒸気と液状水



図－４　細孔における水分平衡特性

４．水蒸気の移動則

雰囲気およびコンクリートの細孔中に存在する気体は水蒸気と空気（水蒸気以外の気体）の混合気体である。混合気体中の水蒸気の流束は、対流による流束と空気との相互拡散による流束の和で表わされるが[3]、乾燥および吸湿過程においては拡散による流束が卓越していると考えられる。したがってここでは、水蒸気の流束として拡散による流束のみを考えることにする。

水蒸気と空気の相互拡散に対してFickの第１法則を適用する。いま簡単のため、気体全体の濃度（密度）に勾配がないとすれば、拡散による水蒸気の流束は次のように表わせる。

$$J_G = -D\,\mathrm{grad}(\rho_G) \tag{8}$$

ここに、J_G：水蒸気の流束[kg/m^2·sec]、ρ_G：水蒸気の濃度（密度）[kg/m^3]、D：水蒸気と空気の相互拡散係数[m^2/sec]である。ただし、式(8)をコンクリート中の水蒸気移動に適用する際には、拡散係数としてコンクリート中における水蒸気の拡散係数を用いる必要がある。コンクリート中では、水蒸気は先述したセメントペースト部分の細孔やその他の空隙を移動経路としている

と考えられる。それらは断面が狭く屈曲しているために、分子運動が自由に行なわれる空間に比べ、拡散速度が遅くなることが予想される[4][5]。拡散経路の屈曲度はコンクリート中の細孔や空隙の構造により決定され、また拡散に有効な空間容積は細孔や空隙の構造だけでなくコンクリート中の液状水量にも依存すると考えられる。しかしながら、現時点では明確な根拠を持ってそれらの依存関係を具体的に決め難いので、ここではコンクリート中における水蒸気拡散係数Ｄは細孔構造を表現する細孔容積分布関数と独立に与え、また液状水量に依存しないとして扱う。

５．質量保存方程式

コンクリート中の水分移動の流束には水蒸気流束と液状水流束があり、現象によって卓越する流束が異なると考えられる。湿度環境下における乾燥および吸湿過程では液状水流束は小さいと考え、ここでは水分の流束として水蒸気流束のみを考える。このとき液状水量の変化は液状水と水蒸気の間の相変態、すなわち蒸発と凝縮のみによって与えられることになる。単位時間、単位体積における液状水から水蒸気への相変態量を相変態速度と定義し、これをv [kg/m^3·sec]と表記すれば、コンクリート中の水蒸気と液状水の質量保存方程式は次のように書ける。

$$\frac{\partial w_G}{\partial t} = -\mathrm{div}(\mathbf{J}_G) + v \tag{9}$$

$$\frac{\partial w_L}{\partial t} = -v \tag{10}$$

質量保存方程式(9),(10)を実際に解くためには、右辺各項が具体的に与えられなければならない。水蒸気流束$\mathbf{J}_G$については、式(8)によりすでにその具体形を示した。コンクリート中における水分の相変態速度vは以下のように扱うことにする。

３章において定式化した、湿度環境下におけるコンクリート中のセメントペースト部分の細孔における液状水と水蒸気の平衡関係が、非定常状態においても成り立つものと仮定する。すなわち『細孔中では液状水と水蒸気は常に平衡状態にあり、水蒸気の移動がある場合は、移動後も平衡関係が満足されるように相変態が行なわれる』とする。本仮定を設けることは相変態速度vを陰な形で与えることに相当する。

以上により、水蒸気と液状水の質量保存方程式を解くことができ、湿度環境下におけるコンクリート中の水蒸気量（あるいは相対湿度）と液状水量の分布の経時変化を得ることができる。本モデルの支配方程式は

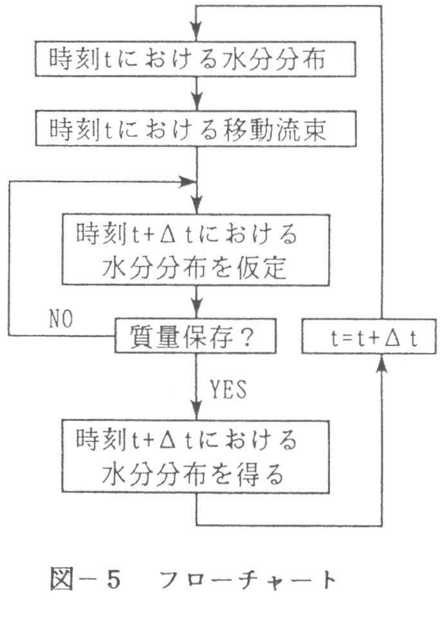
『水蒸気と液状水の平衡則：式(4),(5),(6),(7)』

『水蒸気の移動則：式(8)』

『水蒸気と液状水の質量保存方程式：式(9),(10)』

より成る。また、水分移動の挙動を決定する材料特性は、累積細孔容積分布関数、およびコンクリート中における水蒸気拡散係数により与えられる。

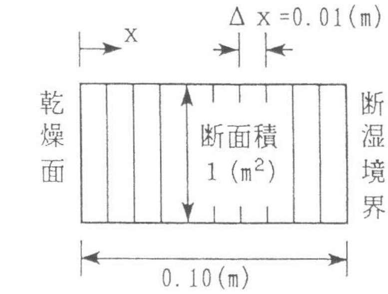
実際に解析を行なう場合の手順は、用いる数値解法によって異なるが、時間に関して陽的な解法を用いる場合のフローチャートを図－５に示す。



図－５　フローチャート

6. 湿度環境下におけるコンクリート中の水分移動の1次元解析

提案した水分移動モデルを用いて、湿度環境下におけるコンクリート中の水分移動の1次元解析を行なった。解析対象供試体は**図－6**に示すように、断面積を単位面積（1 (m²)）、水分移動方向（x方向）の供試体の大きさを0.10(m)とした。2つの境界面のうちの一方（x＝0）を雰囲気に接する境界面、他方（x＝0.10）を水分の出入りがない断湿境界面とした。



図－6　1次元解析対象供試体

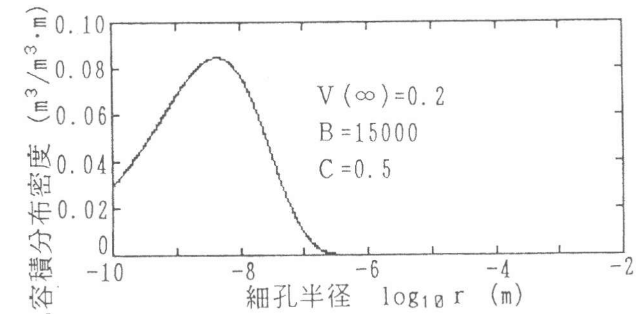
表－1　解析に用いた諸定数の値

気体定数	R=8.31453[J/mol·K]
水の分子量	M=0.01802[kg/mol]
液状水の密度	ρ=1000[kg/m³]
飽和水蒸気圧(20℃)	p_0=2338[Pa]
水の表面張力(20℃)	γ=0.0727[N/m]

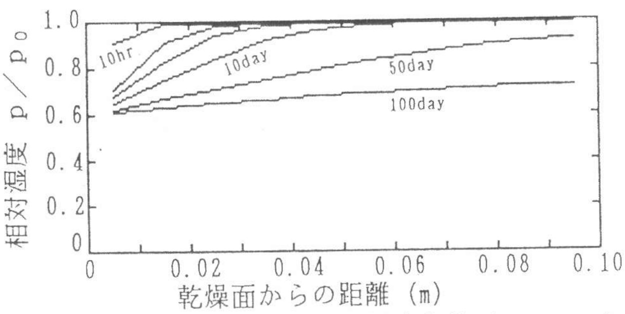
本モデルの支配方程式(4),(5),(6),(7),(8),(9),(10)は非線形の連立方程式であり数値解を求める際に収束計算が必要となる。ここでは支配方程式をそのままの形で解くことを優先し、数値解法として時間と空間に関して陽的な差分解法を用いることにした。要素分割は供試体をx方向に10等分した。時間ステップは収束性を確認したうえでΔt＝500(sec)とした。

ここでは細孔容積分布の異なる2ケースの解析結果を示す。初期条件はともに飽水状態とし、境界条件は温度20(℃)相対湿度60(%)とした。用いた諸定数の値を**表－1**に示す。コンクリート中における水蒸気拡散係数は、ともにD＝1.0×10⁻⁵(m²/sec)とした。

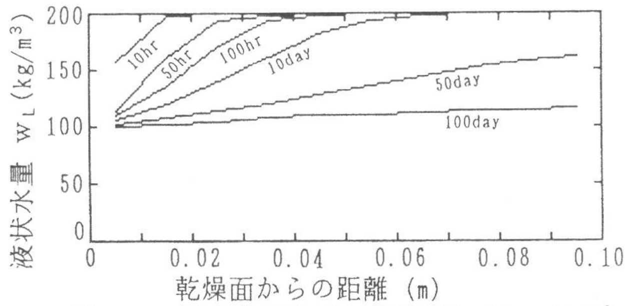
まずケースⅠの解析結果を示す。与えた細孔容積分布を分布密度関数で示したのが**図－7**である。解析結果としてコンクリート中の相対湿度と液状水量のx方向の分布の経時変化を得る。それらを適当な時間ごとに図示したのが**図－8**および**図－9**である。乾燥面に近い部分から相対湿度、液状水量ともに減少しはじめ、乾燥が徐々に深部



図－7　細孔容積分布密度関数（ケースⅠ）



図－8　相対湿度分布の経時変化（ケースⅠ）

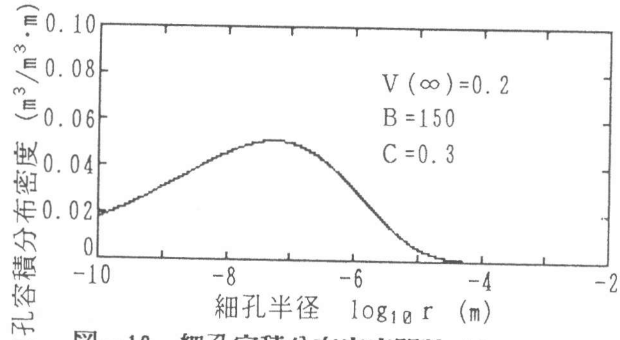


図－9　液状水量分布の経時変化（ケースⅠ）

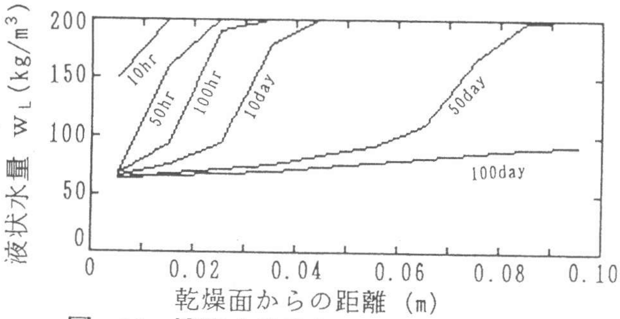
に向かって進行し、供試体全体が雰囲気との平衡状態へと向かうようすが解析結果に現われている。

ケースⅡではケースⅠに比べて細孔容積の分布が緩やかで径の大きい細孔が多い細孔構造を与えた（**図－10**）。液状水量の解析結果（**図－11**）では、雰囲気に平衡する液状水量だけでなく内部の分布形状もケースⅠとは大きく異なった結果が得られている。

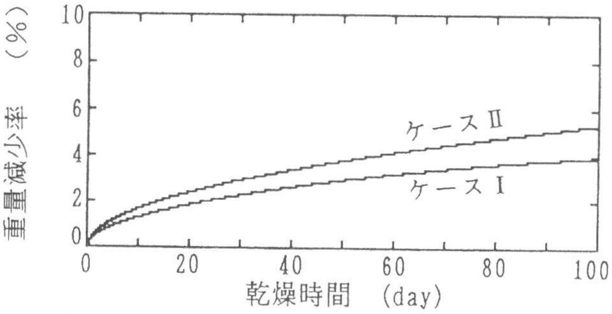
供試体の絶乾密度を、仮に2100(kg/m^3)として、供試体の初期重量に対する重量減少率の経時変化をケースⅠとⅡについて計算し、プロットしたのが**図－12**である。細孔構造の緻密なケースⅠの方が供試体全体として乾燥に対する抵抗性が高いという合理的な結果が得られている。



図－10　細孔容積分布密度関数（ケースⅡ）



図－11　液状水量分布の経時変化（ケースⅡ）



図－12　供試体の重量減少率の経時変化

7．本研究のまとめと今後の課題

本研究ではコンクリートの細孔構造をモデル化し、そこでの水分の存在形態と移動を表現することにより、湿度環境下におけるコンクリート中の水分移動を解析するモデルを定式化した。また、解析を行なうことにより、提案したモデルが合理的な解析結果を与え得ることを示した。

今後は、用いた個々の仮定の妥当性を検討すること、および今回モデル化に至らなかったコンクリート中の細孔以外の空隙組織とそこでの水分挙動をモデルに取り入れ、対象とするコンクリート中の水分移動現象の範囲を拡張することが課題であると考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、東京大学岡村甫教授、前川宏一助教授から貴重な示唆を頂きました。深く感謝致します。

参考文献

1）下村　匠・陳　丙学・小沢一雅：コンクリートの細孔構造と収縮特性，土木学会第46回年次学術講演会講演概要集第5部，pp.478-479，1991.9

2）荒井康彦ほか：工学のための物理化学，朝倉書店，pp.112-126，1991.3

3）平岡正勝・田中幹也：移動現象論，朝倉書店，pp.21-27，1971.3

4）八幡敏雄：土壌の物理，東京大学出版会，pp.108-117，1975.2

5）小宮山宏：移動論，朝倉書店，pp.123-136，1990.4