

論文

[1072] 細孔容積分布密度関数に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル

下村 匠*1・小沢一雅*2・前川宏一*3

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮のメカニズムを解明し、現象の予測手法を確立することは、構造物のひびわれの予測、材料の合理的な性能評価のために不可欠である。本研究は、コンクリートの乾燥収縮に関する材料モデルを提案するものであり、提案するモデルの特徴は、細孔容積分布密度関数[1]を用いることによりコンクリートの組織構造の特性を取り入れていること、メカニズムの考察に基づいた力学モデルの組み合わせにより構成されていることである。

コンクリートの乾燥収縮は、コンクリート中の硬化セメントペースト組織中に存在する水分が逸散し、それにともない組織の体積が変化する現象であり、その一連のプロセスにおいて、セメントペーストの細孔組織構造が重要な役割を演じていると考えられる。そこで本研究では、コンクリートの組織構造を数理的に表現することを出発点として、コンクリート中の水分移動[2]、水分状態の変化にとまなう体積変化[1][3]など、組織中において展開される微視的現象を、統一的な概念のもとに取り扱うことにより、コンクリートの乾燥収縮挙動を表現することを試みた。

2. 細孔容積分布密度関数

コンクリート中の硬化セメントペースト組織は、セメントの水和生成物と、それらの間の微小な空間(細孔)により構成され、細孔の大きさは、広範囲にわたって分布すると考えられる。本研究では、細孔の半径(壁間距離の1/2)と、その大きさの半径を有する部分の容積の関係を、連続関数により表すことで、細孔組織構造をモデル化した[1]。まず単位体積中において0から $r[m]$ までの大きさの半径を有する細孔の累積容積 $[m^3/m^3]$ を、細孔半径 r の関数 $V_{(r)}$ により与える。

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

ここに、 $V_{(\infty)}$; 単位体積中の総細孔容積 $[m^3/m^3]$ 、 B, C ; 関数の形状を決定するパラメータである。累積細孔容積分布関数 $V_{(r)}$ を細孔半径 r について微分すると、半径 r の細孔の分布密度 $[m^3/m^3 \cdot m]$ を表す関数が得られる。この関数 $dV_{(r)}/dr$ を、細孔容積分布密度関数と定義する(図-1)。

$$\frac{dV_{(r)}}{dr} = V_{(\infty)} B C r^{C-1} \exp(-Br^C) \tag{2}$$

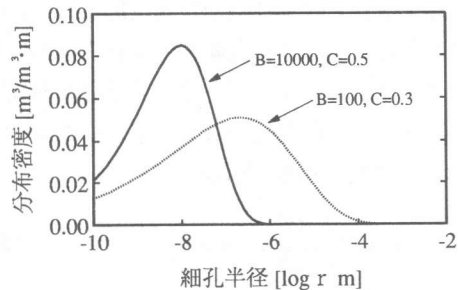


図-1 細孔容積分布密度関数

*1 東京大学助手 工学部土木工学科, 工修(正会員)
 *2 東京大学助教授 工学部土木工学科, 工博(正会員)
 *3 東京大学助教授 工学部土木工学科, 工博(正会員)

3. 細孔組織中の水蒸気と液状水

3.1 水分平衡特性

コンクリート中の水分移動およびコンクリートの乾燥収縮現象において、とりわけ重要なメカニズムは、水の表面張力により生じる細孔中の液状水の圧力降下であると考えられる[4]。半径 r_s [m]の円形毛管に液状水が存在するとき、気液界面は曲率半径 r_s [m]の曲面を形成する。このとき毛管力は、界面をはさんでの気相と液相の圧力差として、Laplaceの式により表される[5]。

$$p_G - p_L = \frac{2\gamma}{r_s} \quad (3)$$

ここに、 p_G ；気相の圧力[Pa]、 p_L ；液相の圧力[Pa]、 γ ；水の表面張力[N/m]である。毛管力により拘束された液状水は、自由な水面を有する液状水に比べて、高い水蒸気圧を示すことができない。温度 T [K]のもとで、半径 r_s [m]の毛管に存在する液状水と水蒸気の平衡関係は、Kelvinの式により表される[4][5]。

$$\ln \frac{p_v}{p_{v0}} = - \frac{2\gamma M}{RT\rho_L r_s} \quad (4)$$

ここに、 M ；水の分子量[kg/mol]、 R ；気体定数[J/mol·K]、 ρ_L ；液状水の密度[kg/m³]、 p_v ；水蒸気分圧[Pa]、 p_{v0} ；温度 T [K]における飽和水蒸気圧[Pa]である。本研究では、式(3)(4)で表される関係が、コンクリートの細孔組織に存在する液状水と水蒸気にも適用できるものとし、これに基づき細孔組織中の水分の状態を表現する。

単位体積中において、その半径が r_s より小さい部分は、液状水により満たされ(図-2)、水分状態の変化にともなう細孔組織の幾何構造の変化が無視できるものとするれば、細孔容積分布密度関数の定義より、単位体積中の液状水量 w_L [kg/m³]は、次のように表される(図-3)。

$$w_L = \rho_L \int_0^{r_s} \frac{dV^{(r)}}{dr} dr = \rho_L V_{(r_s)} \quad (5)$$

以上により、図-4に示す水分平衡特性、すなわち雰囲気相の相対湿度 p_v/p_{v0} と、その環境下において平衡状態にあるコンクリート中の液状水量の関係が導かれる。なお、ここで用いた仮定のみに基づけば、ひとつの相対湿度に対し、平衡状態がただひとつ定まるため、水分平衡特性は完全に可逆となり、仮定した細孔容積分布密度関数の形状により一意的に定まることとなる。

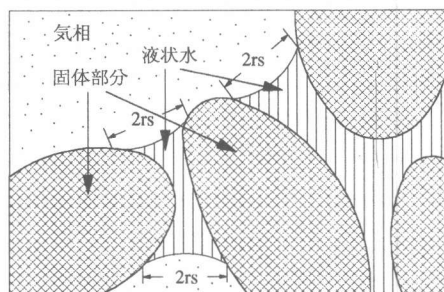


図-2 細孔組織中の液状水

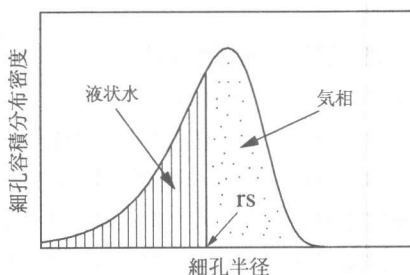


図-3 細孔組織中の液状水量

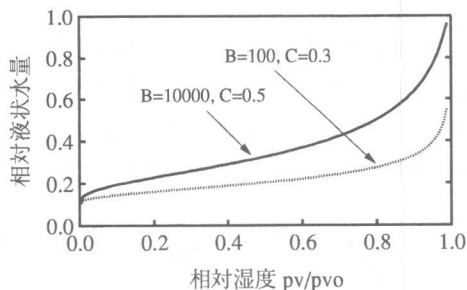


図-4 細孔組織の水分平衡特性