

V-410 細孔構造モデルによるコンクリート中の水分移動および熱伝導の連成解析

東京大学 正会員 下村 匠
東京大学 正会員 小沢一雅

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性能を劣化させるひびわれの原因は多岐にわたるが、一般にマッシュな構造物では温度ひびわれ、断面の大きくない構造物では乾燥収縮ひびわれに対する検討が特に重要となる。しかしながら、たとえばトンネルなどの場合にみられるように、部材の厚さや境界条件によっては、温度応力と乾燥収縮応力の複合作用によるひびわれが発生する場合もあり、適用範囲の広いひびわれ予測を行なうためには、温度ひびわれと乾燥収縮ひびわれを統一的に評価する手法を構築することが必要である。

本研究では、ひびわれの統一的予測の基礎となる、セメントの水和反応を考慮したコンクリート中の水分移動と熱伝導の連成解析モデル¹⁾の定式化を行なった。本モデルは、コンクリートの組織構造を細孔容積分布関数により数理的に表現したこと、水分を水蒸気と液状水の2相に分けて扱ったことが特徴である。

2. コンクリート中の水分移動と熱伝導の支配方程式

コンクリート中の水分移動現象を特徴づけているのは、空隙や細孔などの組織構造であると考え、本研究では、細孔の容積分布を細孔半径 r の関数として表現することにより、コンクリートの組織構造を定量化しモデルに取り入れた²⁾。

$$V(r) = V(\infty) \{1 - \exp(-B r^C)\} \quad (1)$$

ここに、 r : 細孔半径[m]、 $V(r)$: 累積細孔容積分布関数[m³/m³]、 $V(\infty)$: 単位体積あたりの総細孔容積分布関数[m³/m³]、 B 、 C : 関数の形状を決定するパラメータである。

細孔に存在する液状水と水蒸気の平衡関係にKelvinの式を適用すれば、液状水の存在する最大細孔半径 r_s が定まる。 r_s を累積細孔容積分布関数に用いれば、細孔中の液状水量 w_L [kg/m³] と水蒸気の体積 V_G [m³/m³] の関係が表現される(図-1)。

w_L と V_G の関係と、水蒸気の状態方程式を連立することにより水分平衡特性が導かれる(図-2)。本平衡関係はKelvinの式と水蒸気の状態方程式により、温度が考慮されていることになる。

ここでは水分の流束として、空気との相互拡散による水蒸気流束のみを考慮する。セメントの水和反応にともなう水分の消費を考慮した、水蒸気と液状水の質量保存方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial w_G}{\partial t} = -\text{div}(J_G) + v \quad (2)$$

$$\frac{\partial w_L}{\partial t} = -v - \beta C^* H \quad (3)$$

ここに、 w_G : 水蒸気量[kg/m³]、 J_G : 水蒸气流束[kg/m²·sec]、 v : 液状水から水蒸気への相変態速度[kg/m³·sec]、 β : セメントの結合水率[kg/kcal]、 C^* : 単位セメント量[kg/m³]、 H : セメント単位重量あたりの水和発熱速度[kcal/kg·sec]である。相変態速度 v は、図-2により表わされる平衡関係が、微小体積中において常に満足されるように相変態が行なわれるという仮定を設けることにより求めた。

水蒸気によって輸送される熱を無視し、セメントの水和反応にともなう発熱、液状水から水蒸気への相変

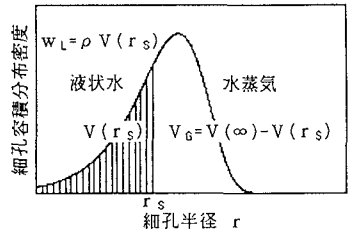


図-1 細孔中の水蒸気と液状水

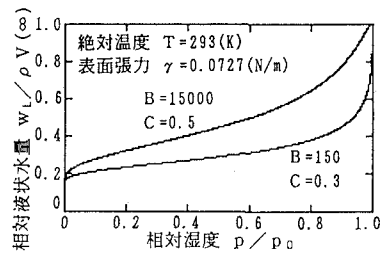


図-2 細孔における水分平衡特性

態にともなう吸熱(気化熱)を考慮すれば、熱伝導の支配方程式は次のようになる。

$$c \rho_c \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div}(\lambda \text{grad} T) + C \cdot \underline{H} - Q_w v \quad (4)$$

ここに、 T : 温度[K]、 c : コンクリートの比熱[kcal/kg·K]、 ρ_c : コンクリートの密度[kg/m³]、 λ : コンクリートの熱伝導率[kcal/m·sec·K]、 Q_w : 水の気化熱[kcal/kg]である。

セメントの水和反応モデルには、反応速度の温度依存性が考慮された水和発熱モデル³⁾を用いた。

$$\underline{H} = \underline{H}(T_s, Q) \exp \left[-\frac{E(Q)}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \quad (5)$$

ここに、 T_s : 基準温度[K]、 Q : セメント単位重量あたりの積算発熱量(= $\int \underline{H} dt$) [kcal/kg]、 $\underline{H}(T_s, Q)$ と $-E(Q)/R$: セメントの反応特性を表わす材料関数である。

また本研究では、水和の進行にともなう組織の緻密化を、細孔容積分布関数の単位体積あたりの総細孔容積 $V(\infty)$ および関数の形状を決定するパラメータ B 、 C を積算発熱量に依存させることにより表現した(図-3)。

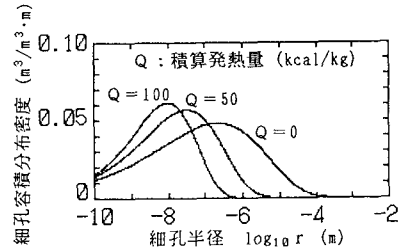


図-3 細孔構造の緻密化

3. モデルによる1次元解析

セメントの水和発熱に起因する温度勾配と、表面からの乾燥に起因する水分勾配の双方が、断面全体にわたって顕著となるのは、部材厚さが中程度の場合であると予想される。ここでは部材厚さを0.40(m)とした場合の解析例を示す。境界条件は時間0から1(day)までは両境界面とも断熱、断湿とし、その後温度20(°C)相対湿度60(%)のもとで一方の境界面から放熱と乾燥が起こると設定した。

図-4に温度分布の経時変化を、図-5に液状水量分布の経時変化を示す。熱と水分とでは移動速度が異なるため、分布の勾配の形成される時間に違いがみられる。2つの移動現象がともに活発に進行するのは、本解析ケースの場合、時間が1~10(day)程度、境界面からの距離が0~0.05(m)程度の範囲においてであり、この範囲において連成解析が有効な解析手法となることが示唆される。

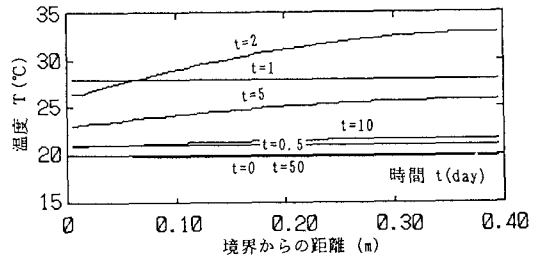


図-4 温度分布の経時変化

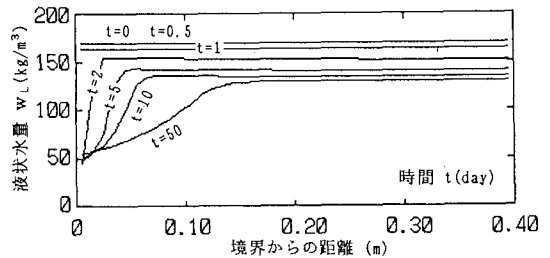


図-5 液状水量分布の経時変化

謝辞

本研究は平成2年度土木学会吉田奨励金(A)の助成を受けて行なった。ここに付記して謝意を表わす。

参考文献

- 1) 滝口克己・堀田久人: 若材令コンクリートの水和発熱および乾燥による初期応力に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集 第419号, pp.153-162, 1991.1
- 2) 下村 匠・小沢一雅: 細孔構造モデルによるコンクリート中の水分移動解析, 第14回コンクリート工学年次講演会, 投稿中
- 3) 鈴木康範・辻 幸和・前川宏一・岡村 甫: コンクリート中に存在するセメントの水和発熱過程の定量化, 土木学会論文集 第414号/V-12, pp.155-164, 1990.2