

V-372

コンクリート中の水・熱同時移動解析

東北工業大学 正会員 秋田宏
岩手大学 正会員 藤原忠司
東北大学 正会員 尾坂芳夫

1. まえがき

セメント硬化体中の水分移動を拡散現象としてとらえ、別報ではまずモルタルについて非線形拡散方程式による解析を試みた¹⁾。しかし、水分移動の過程では、液体の水から水蒸気になる際の蒸発熱がかなり大きいため、水分のみではなく熱との同時移動解析とするのがより一般的な取り扱いである。ただし、常温の一定温度、一定湿度で自然に乾燥させる実験条件では、熱の影響が大きいとは思われないが、それがどの程度であるのかを確認する必要がある。

2. 解析理論

解析に適した変数として、相対含水率 R を次式により定義する。すなわち、

$$R = \psi / \psi_s \times 100 \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 ψ ：含水率、 ψ_s ：飽水時の含水率である。現状は諸定数に対する知識が十分でなく、水と水蒸気の移動を個別に扱うことが困難なので、気・液水分をまとめて扱い、圧力が一定の場合に限れば、基礎方程式は次のようになる²⁾。

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \nabla(D \nabla R) \quad \dots\dots(2)$$

$$\rho C_c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + Q \frac{\partial R}{\partial t} \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 t ：時間、 ∇ ：微分演算子（ $i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$ ； i, j, k は x, y, z 方向の単位ベクトル）、 D ：水分伝導率、 ρ ：コンクリートの密度、 C_c ：コンクリートの比熱、 T ：温度、 λ ：コンクリートの熱伝導率、 Q ：水の蒸発熱であり、(3)式の右辺第2項は水分の蒸発により奪われる熱量を表わしている。飽水状態からの乾燥では、これを初期条件 $R(x, y, z, t) = 100 \quad \dots\dots(4)$

$$T(x, y, z, t) = T_0 \quad \dots\dots(5)$$

境界条件

$$\frac{\partial R}{\partial n} + \alpha_m (H_s - H_0) = 0 \quad \dots\dots(6)$$

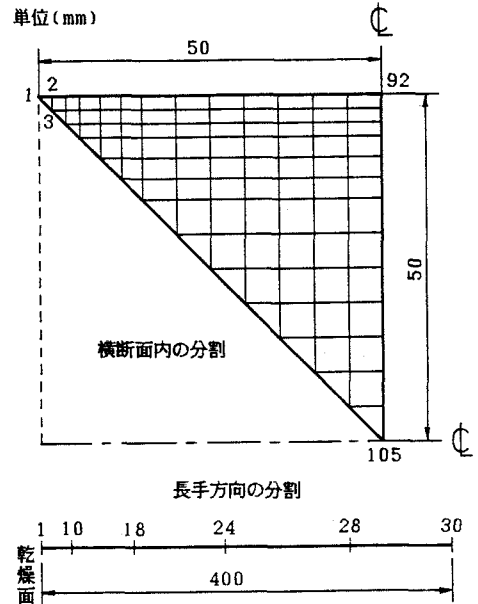


図-1 モデル分割

表-1 諸定数

コンクリート	熱伝達率 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	5.41
	熱伝導率 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	1.34
	密度 (kg/m^3)	2300
	比熱 ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	1.05
水	蒸発熱 ($kJ \cdot kg^{-1}$)	2448
	温度降下に対する蒸気圧低下 (%)	6
	毛管水移動から水蒸気拡散に 変る相対含水率 (%)	95

表-2 水の物理定数

温度 ($^{\circ}C$)	19	20	21
飽和蒸気圧 (kPa)	2.197	2.308	2.486
蒸発熱 ($kJ \cdot kg^{-1}$)	2450	2448	2446

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_c (T - T_0) + q \quad \dots\dots (7)$$

のもとに解けば良い。ここで、 T_0 ：雰囲気温度、 n ：乾燥面の法線ベクトル、 α_m ：水分伝達率、 α_c ：熱伝達率、 H_s 、 H_0 ：乾燥表面および雰囲気相対湿度、 q ：表面からの蒸発による吸収熱である。

3. 水・熱同時移動解析

水と熱の同時移動を扱う場合、1面乾燥実験であっても、蒸発熱による冷却が側面からの熱の流入を引き起こすため、現象が1次元的是るかどうかが不明である。したがって、対称性から全体の1/8を取り上げた図-1の計算モデルにより解析した。諸定数は表-1に示したものをを用い、コントロールボリューム法により離散化し、時間積分は完全陰解法、時間きざみを6分とした。

コンクリート中の水分移動は、高含水領域での毛管水移動と低含水率領域での水蒸気拡散を含み、現象が単一の過程ではないために、蒸発熱の影響を次のように取り扱った。水分移動が毛管水移動から水蒸気拡散に変わる限界は、相対含水率で90~95%とされている³⁾。したがって、供試体内部では相対含水率が95%まで減少する間は蒸発熱を考慮する必要はなく、それ以下になってからの水分減少量に対しては、式(3)の右辺第2項を適用する。また、乾燥面から逸散する水分のうち、内部の蒸発分を差し引いた残りが、毛管作用により液体のまま表面まできて蒸発する部分なので、(7)式において対応する蒸発熱を計上する。

さらに、蒸発熱により乾燥表面の温度が下がると、境界条件(6)式をそのまま用いることができない。なぜならば、水分伝達は水蒸気圧の差による拡散現象であって、同じ温度に限り相対湿度差で表わされるものである。したがって温度が異なる場合には、表-2に示すような飽和蒸気圧の変化する割合で、相対湿度を補正する必要がある。

雰囲気相対湿度を60%とした場合について、計算結果を乾燥面の中心および隅角部で温度および相対含水率の時間変化として示せば図-2となる。蒸発による温度降下は、乾燥開始後1時間半で最大0.8℃に達し、以後蒸発量の減少とともに減少することが知られる。また、表面の相対含水率は急速に低

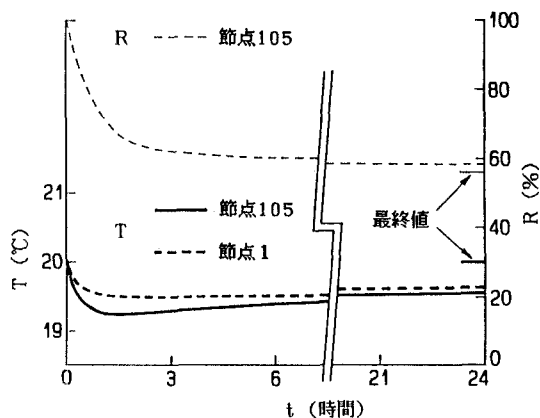


図-2 表面の温度および相対含水率変化

下し、2時間程度で雰囲気と平衡する相対含水率に近い値となる。蒸発熱による温度降下が側面からの流入熱量で補われることの影響は小さく、断面内の温度差は最大でも0.2℃、相対含水率では0.9%であった。

4. あとがき

コンクリートやモルタルの水分移動を解析する際に必要となる具体的な資料を提供することを目的とし、コントロールボリューム法による数値計算を行って検討した結果、明らかになった点は以下のようである。

(1) 1次元の常温・自然乾燥実験において側面からの熱の流入による3次元効果は小さく、本実験の供試体に対応するモデル計算の結果では、断面内の温度差0.2℃、相対含水率差0.9%であった。

(2) 常温での自然乾燥過程で、蒸発熱の影響はモデル計算によれば、温度降下に対し最大で0.8℃程度であった。

参考文献

- 1) 秋田宏・藤原忠司・尾坂芳夫：モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動，土木学会論文集，投稿中
- 2) 中村泰人・他：新建築学体系10，彰国社，pp.105-182，1984.
- 3) 桐原良三・林信也：乾燥，化学工学，Vol.25，No.9，pp.675-690，1951.