

III-389 地下空間におけるコンクリート壁内の水分移動に関する基礎研究

埼玉大学 工学部 正員 佐藤 邦明

(株)熊谷組 原子力開発室 正員○伊藤 洋

(株)熊谷組 原子力開発室 正員 坂口 雄彦

1. はじめに

近年、都市部において大深度地下空間を交通や生活空間などに利用しようとする動きが活発になってきており、技術面からのアプローチも強く望まれるところとなっている。中でも、地下空間における地下水に係わる諸問題は重要な課題の一つである。

本論では、こういった背景の中で、地下空間内の環境評価(湿度、結露など)に係わるコンクリート壁内の水分移動に注目し、その基礎的検討を行ったものである。前回の報告¹⁾では、基礎実験の結果を示して若干の考察を加えたが、本報告では実験装置を一部改良した実験を行い、さらにその理論的検討において前回のPhilipとDe Vriesのモデルにガス圧・移流の影響を考慮した三相流(液相、水蒸気相、空気相)モデルを適用する²⁾。ここでは、基礎式を提示し、代表的な実験結果との比較を行う。

2. 基礎式

ここで想定するコンクリート壁内の水分移動の概念は、図-1に示したように空間内に浸出面が現れず、地盤側が飽和帯となり空間内側が不飽和帯となる場合である。水分の移動は、この後者における蒸発・乾燥過程に支配されることになる。さらに、この蒸発・乾燥過程では水の相変化(液相 $\rightleftharpoons$ 水蒸気相)が起こるので、温度変化を同時に生じることになる。PhilipとDe Vriesのモデルでは、熱エネルギー方程式を組み込んで、水分の移動を水分勾配と温度勾配で表現している。しかし、このモデルでは水分のみの移動に着目しており、ガス圧やガス移流の影響が無視されていた。ここではガス圧およびガス移流を考慮し、基礎式を結果的に以下のように与える²⁾。

$$\partial(\rho_l \theta_l + \rho_v \theta_v) / \partial t + \nabla(\rho_l U_l + \rho_v U_v + J_v) = 0 \quad (\text{水分移動}) \quad (1)$$

$$(\rho c)^* \partial T / \partial t = \nabla(\lambda \nabla T) - (c_g \rho_g U_g + c_l \rho_l U_l) \nabla T - \Delta h_v m \quad (\text{熱移動}) \quad (2)$$

$$U_l = -K_l / \mu_l (g \nabla p_l + \rho_l i) \approx - (D_{Tl} \nabla T + D_{0l} \nabla \theta + k_l i / g),$$

$$U_g \approx -K_g g / \mu_g \nabla p_g \approx -k_a R_a (1 + T / \rho_a \cdot \partial \rho_a / \partial T) \nabla T,$$

$$J_v = -\rho_g D' \nabla(\rho_v / \rho_g) \approx (\rho_v / \rho_a \cdot \partial \rho_a / \partial T - \partial \rho_v / \partial T) D' \nabla T,$$

ここに、 ρ_l : 液状水密度、 ρ_v : 水蒸気密度、 ρ_g : ガス密度、 ρ_a : 空気密度、 θ : 体積含水率、 θ_l : 液状水体積含水率、 θ_g : 体積含有ガス率、 U_l : 液状水移流速度、 U_g : ガス移流速度、 J_v : 水蒸気拡散量、 T : 温度、 $(\rho c)^*$: 等価熱容量、 λ : 等価熱伝導率、 c_g : ガス比熱、 c_l : 液状水比熱、 Δh_v : 蒸発熱、 m : 蒸発量率、 p_l : 液状水の水圧、 p_g : ガス圧、 i : 単位ベクトル、 D_{Tl} : 熱液状水拡散係数、 D_{0l} : 等温液状水拡散係数、 k_l : 液状水透水係数、 K_l : 液状水浸透係数、 k_a : 空気透気係数、 K_a : 空気浸透係数、 μ_l : 液状水粘性係数、 μ_g : ガス粘性係数、 g : 重力加速度、 R_a : 空気の気体定数、 D' : 水蒸気の拡散係数、 t : 時間、である。

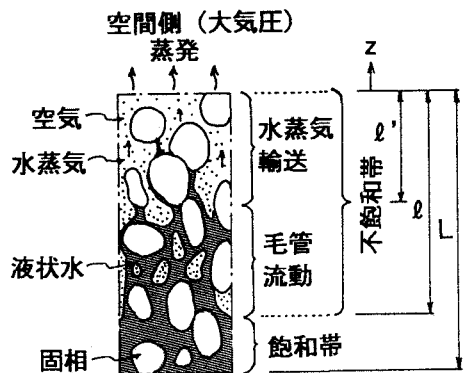


図-1 水分移動の概念

3. 実験結果との比較

基礎式(1)、(2)から得られる定常解と代表的な実験結果を比較検討する。まず、定常解はz軸方向の一次元問題として結果的に以下になる。

$$\partial \theta / \partial z = - \{ (\rho_1 D_{T1} - I_v) \partial T / \partial z + \rho_1 k_1 i / g + q_E \} / (\rho_1 D_{01}) ; \text{水分移動}$$

$$m = I_v \partial^2 T / \partial z^2, \quad q_E = m V, \quad \text{----- (3)}$$

$$T = C_1 \exp(\zeta z) + C_2 (-\ell' \leq z \leq 0), \quad T = C_3 \exp(\xi z) + C_4 (-\ell \leq z \leq -\ell') ; \text{温度分布}$$

$$\text{----- (4)}$$

ここに、 I_v ：水蒸気移動に係わる係数、 q_E ：蒸発量、 V ：媒体の蒸発対象体積、 ζ, ξ ：蒸発速度に係わる係数、 $C_1 \sim C_4$ ：積分定数である。

一方、実験装置は前回報告¹⁾と同じものを用いるが、供試体表面にアクリルケースを取付けて密閉空間を設け、循環通気により乾燥剤へ蒸発水を吸収させる方法、あるいは湿度の上昇量から換算する方法により蒸発量を測定する（図-2）。図-3、4は円柱コンクリート供試体における定常状態（7日後）における結果の一例である。定常解は、Runge-Kutta-Gill法により解析する。図-3は、体積含水率の分布である。含水率は表面へ向かって大きく減少しており、蒸発に伴う水分移動が示唆される。理論解は、ガス移流を考慮した方がよく一致している。図-4は、その時の温度分布を示したものである。蒸発潜熱の影響により僅かではあるが表面に向かって減少していることが確認できる。この場合の理論解は、温度差が小さいためガス移流効果は明確に表れていないが、実験値とはよく一致している。つぎに、図-5は平板コンクリート供試体における累積蒸発量を示したものであるが、3日目からを定常状態とみなすと2g/d程度となっている。理論解より実験値の方が若干大きくなっているが、概ね一致している。

以上、コンクリート中の水分の移動モデルに関し、従来のものにガス移流効果を考慮したものを考え、実験結果と比較的よい一致をみた。しかし、この種（乾燥、蒸発）の問題は、まだ未解明のことが多く、さらに進んだ検討が必要であろう。

なお、本実験を実施するに当たり協力していただいた斉藤満義氏（埼玉大学生）にお礼申し上げる。

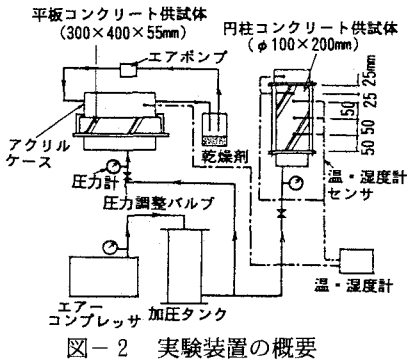


図-2 実験装置の概要

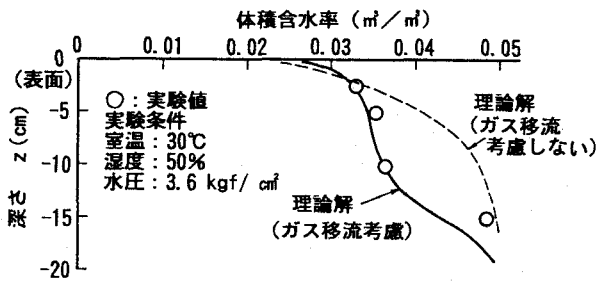


図-3 体積含水率の分布

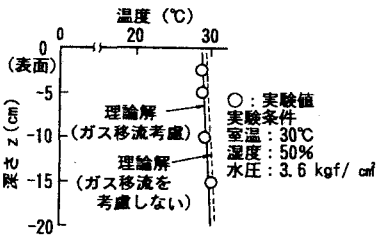


図-4 温度分布

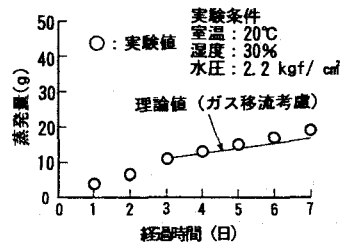


図-5 累積蒸発量

参考文献 1) 佐藤ほか：地中コンクリート内における水分移動に関する基礎実験，土木学会第44回年講Ⅲ，1989.10.， 2) Borjes, S.: Recent advances in modelization of coupled heat and mass transfer in capillary-porous bodies, Keynote Lecture I.D.S '88.