

コンクリート中の水蒸気拡散係数に関する一考察

福井大学工学部 正会員 脇 敬一 *

福井大学工学部 正会員 福原輝幸 **

鉄建建設技術研究所 正会員 柳 博文 ***

1. はじめに コンクリート中の熱・水分移動はひび割れや耐久性の観点から工学的に重要な問題である。また、筆者ら¹⁾および伊藤ら^{2,3)}は、地下空間を形成するコンクリート覆工中の水分移動が地下居住環境に微妙な影響を及ぼすこと、およびそれが地下空間の温度、湿度のみならず、コンクリートの透水性にも支配されていることを示した。このことより筆者らの行っている貯水槽熱貯蔵システム⁴⁾に対しても、貯水槽内で起こる蒸発に伴って貯蔵壁体（コンクリート）中を移動する水蒸気の顕熱および相変化（潜熱）が、システムの熱貯蔵効率にいかに関与を及ぼすかは興味深い。

そこで本論では、気乾および表乾状態のモルタルおよびコンクリート供試体を用いた水蒸気拡散実験を行い、供試体中での内部蒸発を考慮した水蒸気移動のモデル化を試み、このモデルにより水蒸気拡散係数の特性を検討する。

2. 実験方法の概要 水蒸気拡散実験は、図-1に示すように厚さ $H = 0.015 \sim 0.04\text{m}$ 程度の供試体を蒸発量測定用カバーとアクリル容器の間に挟み、アクリル水槽内の純水（イオン交換水）を水蒸気の状態にして供試体内を透過させ、その透過水蒸気量を測定するものである。恒温恒湿室内で行われる実験手順は、まずアクリル容器内に純水を入れて気乾および表乾状態の供試体を装着し、所定の温度（ 50°C ）に保った恒温水槽内に設置後、周囲を発泡スチロールで断熱する。その後、乾燥剤を入れた蒸発量測定用カバーを供試体上部に被せその周囲をシリコンで被覆し、供試体の上部および下部の温度・湿度を計測する。そして、実験環境が熱・水分平衡状態に達したこと（図-2参照）を確認した後、これより約2日の間にわたり透過水蒸気量を計測する。なお、サンプリング時間は2時間である。また、モルタルおよびコンクリートの透水係数は、変水位法により求められる。ここでは気乾状態から始めた供試体をグループA、表乾状態ら始めた供試体をグループBとする。

3. コンクリート中の水蒸気拡散モデル 目視観察を基に水蒸気拡散実験における供試体の水分状態を単純化したものが、図-3である。アクリル水槽中から蒸発した水蒸気が供試体の底面に付着すると、水蒸気は供試体に吸収されて液状水に変わり、時間が経過すると供試体底部は高含水状態となる。一方、供試体上部は実験を通して気乾状態である。そこで供試体中の水分移動を次のように仮定する。供試体は底部高含水状態を飽和とみなし、この飽和域（厚さ H_s ）とその上に位置する乾燥域（厚さ H_d ）から成るとする。このとき供試体内部では飽和域と乾燥域の境界（界面）で液状水が蒸発（内部蒸発）により水蒸気に相変化する。さらにこの水蒸気が乾燥域を拡散移動しながら、供試体上面を横切り大気へ向かう。

キーワード：水蒸気移動、水蒸気拡散係数

* 〒910-8507 福井市文京 3-9-1・TEL0776-23-0500 内線 2811・FAX0776-27-8746

** 〒910-8507 福井市文京 3-9-1・TEL0776-23-0500 内線 2809・FAX0776-27-8746

*** 〒286-0825 成田市新泉 9-1・TEL0476-36-2355・FAX0476-36-2380

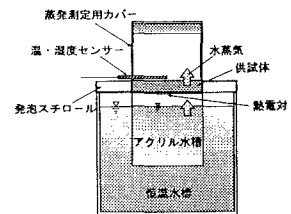


図-1 試験装置の概略

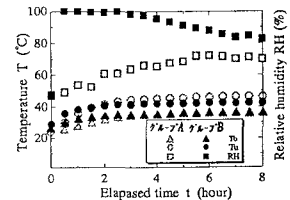


図-2 実験中の温度と湿度の経時変化

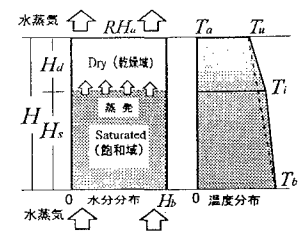


図-3 供試体中の蒸発、水蒸気拡散および温度分布に関する概念

4. 水蒸気拡散係数の決定方法 図-3 の模式図に従うと、飽和域の厚さ H_s と乾燥域の厚さ H_d はそれぞれ次のようになる。

$$H_s = S_r H, H_d = (1 - S_r) H \quad (1)$$

ここに、 S_r は飽和度 ($= \theta / \varepsilon$, θ : 体積含水率, ε : 空隙率) である。供試体は熱平衡状態にあることから、温度分布は理論的に図-3 右図のような二つの直線分布で与えられ、供試体上面温度 T_u 、飽和域と乾燥域の境界（界面）温度 T_i および底面温度 T_b で規定される。 T_u および T_b は実験的に求められる。一方、 T_i は界面で乾燥域と飽和域を横切る熱エネルギーフラックス（フーリエ法則に従う）が等しいこと、および温度連続条件を考慮すると、 T_i は次式で計算される。

$$T_i = (\lambda_{sat} T_b H_d + \lambda_{dry} T_u H_s) / (\lambda_{sat} H_d + \lambda_{dry} H_s) \quad (2)$$

ここに、 λ_{sat} : 飽和域の熱伝導率 (0.79 W/mK)、 λ_{dry} : 乾燥域の熱伝導率 (0.54 W/mK) である。

3. で述べたように供試体の水蒸気拡散は乾燥域を対象とすればよいから、水蒸気フラックス密度 M_v は水蒸気拡散係数 D_{vap} および乾燥域の厚さ H_d を用いて次式で与えられる。

$$M_v = -\varepsilon D_{vap} (\rho_{vu} - \rho_{vi}) / H_d \quad (3)$$

ここに、 ρ_{vu} : 供試体上面水蒸気密度、および ρ_{vi} : 界面水蒸気密度であり、それぞれ以下の式で表される。

$$\rho_{vu} = \rho_{vs}(T_u) RH_s / 100, \quad \rho_{vi} = \rho_{vs}(T_i) RH_i / 100 \quad (4)$$

ここに、 ρ_{vs} : 飽和水蒸気密度、 RH_s : 供試体上面湿度、 RH_i : 界面相対湿度であり、後者は 100% と仮定する。

5. 結果と考察 表-1 はグループ A およびグループ B の S_r の範囲を示したものであり、当然ながら両グループ間では大きな S_r の違いが生じる。式(2)および式(4)を式(3)に代入し、得られた水蒸気拡散係数 D_{vap} と透水係数 k の関係を図-4 に、飽和域を考慮しないで (H を乾燥域とみなして、式(4)中、 H_d の代わりに H および ρ_{vi} の代わりに供試体底面での水蒸気密度 ρ_{vb} を用いて) 計算された結果を、図-5 にそれぞれ両対数で示す。両者とも D_{vap} と k の間には正の相関があり、坂口³⁾らの結果と同様に直線分布を呈する。両図の比較より、飽和域を考慮した (H_d を乾燥域とする) 式(3)の場合には、 D_{vap} と k のデータは供試体の含水率に関係なく一つの回帰直線の周辺でばらつくのに対して、飽和域を考慮しない (H_d の代わりに H および ρ_{vi} の代わりに ρ_{vb} を用いて計算した) 場合では、供試体の含水率に依存して D_{vap} と k の関係に差が現れる。すなわち、同じ k でもグループ A に比べてグループ B の方で D_{vap} は大きくなる。また図-4 を基にコンクリートとモルタルの D_{vap} を比較すると、本実験に関しては有意な差は認め難い。

6. おわりに 本水蒸気拡散試験を通してコンクリートの水蒸気拡散係数 D_{vap} を算定する場合には、供試体の含水状態および内部蒸発を考慮する事は重要と考える。

今後はコンクリートやモルタルの透水性に関わる基礎データを蓄積し、試験法や評価法を併せて確立すると共に、さらに検討することが重要であると思われる。なお、本研究の遂行において熊谷組技術研究所の西山氏に協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献 1) 福原輝幸ほか: 地下空間の換気による覆工の蒸発・乾燥過程と湧水メカニズム, 土木学会「地下空間利用シンポジウム」, 1992. 2) 伊藤洋ほか: 地下空間内外環境に関わるコンクリートの透水性評価について, 土質工学会「地下空間利用における大深度地盤に関するシンポジウム」, 1993. 3) 坂口雄彦, 伊藤洋: 水蒸気拡散試験による透水係数の予測について, 土木学会第 51 回年次講演会, 1996. 4) 渡邊洋ほか: 地下貯水槽気間蓄熱方式による融雪システムの熱的特性, 土木学会第 51 回年次講演会, 1996.

表-1 飽和度の範囲

グループ	S_r	シンボル
A	0.315~0.494	○ □
B	0.705~0.957	● ■

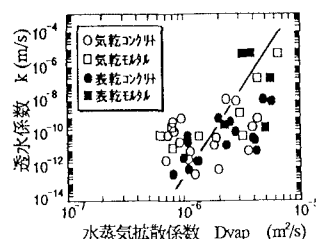


図-4 D_{vap} と k の関係 (乾燥域厚さ = H_d)

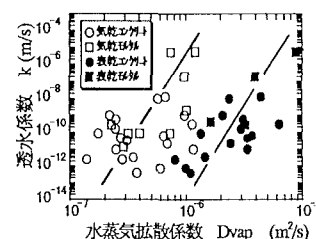


図-5 D_{vap} と k の関係 (乾燥域厚さ = H)