不飽和コンクリート中の水蒸気移動特性と水蒸気拡散係数

柳　博文*1・福原輝幸*2・脇　敬一*3・松岡　茂*4

要旨：コンクリート中の液状水および水蒸気移動は，コンクリート製品の寿命および品質管理に重要な影響を及ぼす。そこで本研究では，コンクリートの蒸発フラックス密度および水蒸気拡散係数の特性を明らかにするために実験的検討を行うとともに，コンクリート内部蒸発が飽和域と乾燥域の境界で起こると仮定した飽和－乾燥２層モデルを提案する。このモデルに従うと，水蒸気拡散係数 D_{vap} (m^2/s)と透水係数 k (m/s)の関係は，供試体の含水状態に依存することなく $D_{vap} = ak^b$(a=1.5×10^{-5}，b=0.1)となることが示された。さらに，コンクリートの蒸発フラックス密度は硬化セメントペーストのそれから推定可能である。

キーワード：透水係数，熱・水分移動，水蒸気拡散係数，飽和－乾燥２層モデル

1.　研究の目的

コンクリート中の熱・水分移動は，蒸発・乾燥に伴うひび割れ，漏水，さらには下水，酸性雨の浸透および塩害に伴うコンクリート劣化防止および構造物の耐久性の観点から工学的に重要な問題である。実際のコンクリートは不飽和状態にある場合が多いので，液状水および水蒸気移動量を正確に評価することは不飽和多孔媒体中の物質移動の機構解明からも重要なことである。

筆者らは，コンクリート内部蒸発が飽和域と乾燥域の境界で起こると仮定した熱・水分移動に関する飽和－乾燥２層モデル（以下，２層モデルと呼称）を提案するとともに，コンクリート，モルタル並びに硬化セメントペースト供試体を用いた水蒸気拡散実験を行った。その結果を２層モデルに従って，水蒸気移動理論を乾燥域に適応して，蒸発フラックス密度および水蒸気拡散係数を評価し，コンクリート中の水蒸気移動特性を明らかにした。

2.　研究の手法

供試体中の水蒸気移動は，蒸発した水蒸気が供試体底面に付着し，時間が経過すると供試体底面は飽和状態になるが，一方で供試体上部は気乾状態になる。供試体は低部より飽和域，不飽和域，乾燥域に分離されるが，ここでは供試体を**図－1**(a)中の実線のように，下部飽和域と上部乾燥域の２層に単純化する。これが熱・水分移動に関する基本構成である。このとき乾燥域の厚さ D および飽和域の厚さ $L(=H-D)$ は，それぞれ飽和度で表される。コンクリート供試体の内部蒸発は，主に飽和域と乾燥域の境界（界面）で起こると考える。すなわち，飽和域の液状水は界面で蒸気状水に相変化し，水蒸気として乾燥域を拡散しながら，供試体上面を横切って大気へ向かう。従って，蒸発フラックス密度は乾燥域に適用される水蒸気拡散則から評価できる。

水蒸気拡散実験では，表乾供試体と気乾供試体を作製した。供試体を蒸発量測定用

*1 鉄建建設㈱技術研究所　土木技術開発グループ，工博（正会員）
*2 福井大学教授　工学部建築建設工学科，工博
*3 福井大学技官　技術部第二技術室
*4 鉄建建設㈱技術研究所土木技術開発グループ主席研究員，工博（正会員）

カバーとアクリル容器の間に挟む。50℃に保たれた恒温水槽に置かれたアクリル容器内の純水(イオン交換水)は蒸発し，供試体底面で凝縮した後，供試体中を浸透上昇する。浸透液状水は内部蒸発により水蒸気に相変化し，拡散上昇して最終的に蒸発量測定用カバーへ向かう。この増重量から蒸発フラックス密度 m_v を，供試体の体積含水量から飽和度 S_r を求める。さらに，これと類似した方法で温度 35，50，65℃の定常時における硬化セメントペーストおよびコンクリート表乾供試体の m_v および S_r を求める。

3. 得られた主な成果

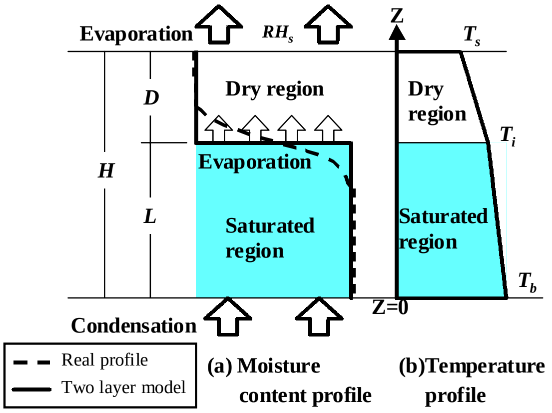
水蒸気拡散係数 D_{vap} と透水係数 k の関係を両対数にて**図－2** に示す。表乾，気乾供試体に依存せず，D_{vap} と k の関係は一義的である。データのばらつきはあるものの，両者の関係は図中の式で与えられる。これより，**図－1** で示したように飽和度 S_r の違いによる水蒸気拡散域（乾燥域）の変化を考慮した２層モデルの妥当性が示された。

図－3 に硬化セメントペーストの蒸発フラックス密度 m_{vc} により，無次元化した m_v/m_{vc} と V_c/V（体積セメント率）の関係を示す。m_v/m_{vc} と V_c/V（$0.1 \leqq V_c/V \leqq 0.4$）の間には，概ね図中のような１価の関係が成立する。これより，同一な外部環境条件（外部蒸発能力）であればコンクリートの蒸発フラックス密度は，硬化セメントペーストの蒸発フラックス密度より概ね推定可能であることが示唆される。

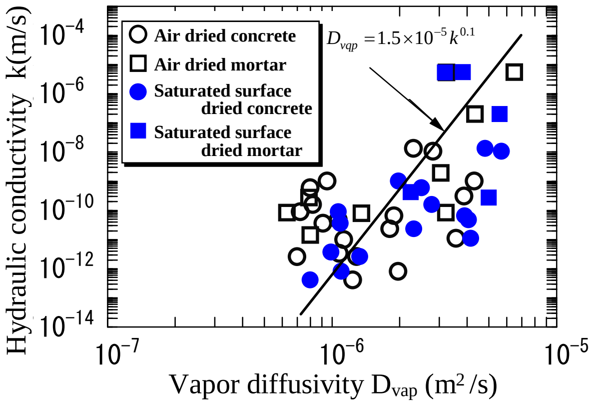
4. 結論

本研究では，コンクリートの蒸発フラックス密度および水蒸気拡散係数の特性を調べるために，実験および理論的な検討を行った。その結果，飽和－乾燥２層モデルにより，気乾および表乾供試体に依存せず，水蒸気拡散係数と透水係数の関係は１価関数で表すことができた。また本実験の範囲内においては，同一な外部環境条件であれば，コンクリートの蒸発フラックス密度は，硬化セメントペーストの蒸発フラックス密度より概ね推定可能である。

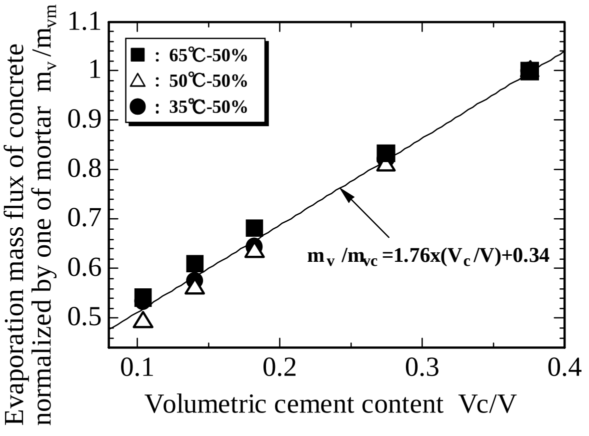
本論文は，「コンクリート工学論文集」，Vol12，No.3，pp61-67，2001.9 に掲載されたものである.



図－1 水分拡散実験の概念



図－2 透水係数と水蒸気拡散係数の関係



図－3 無次元蒸発フラックス密度と体積セメント率