

報告

[1084] コンクリート表面からの水分蒸発過程による透水性評価実験

伊藤 洋*¹・坂口雄彦*²・前村辰二*³・藤原 愛*⁴

1. はじめに

コンクリート表面付近における水分の蒸発現象は、乾燥収縮のみならず中性化、劣化、塩分浸透といった耐久性に係わる問題、加えて建物内の湿気や透水試験法などの透水性評価に係わる問題にも関与する重要な課題である。しかし、コンクリート中の水分移動と表面の蒸発過程に焦点を当てた研究は少なく、今後の取り組みに期待されるところが大きいと考えられる。

本研究では、こういった背景にあって、コンクリート表面からの蒸発量を基礎的に評価することを目的として、2種類のベンチレーション試験法を提案し、円柱供試体を用いて表面蒸発量測定的基础実験を行った。その結果、ここで提案した方法によりコンクリート表面からの水分蒸発量評価が可能であることが示唆され、また透水性評価に有用な知見が得られたと思われるのでここに報告する。

2. 水分移動の概念とモデル化への仮定

コンクリート中における水分移動現象は、コンクリート中の水分状態、水和反応、温度、空隙形態、周辺環境などに支配されるため厳密にはかなり複雑な挙動となるが[1]～[3]、ここではコンクリートは安定した透水媒体と考え、水分状態の変化のみを考えることとする。図-1は、コンクリート供試体をモデルとして、その下面から水圧が作用し、上面において水分が蒸発するときの水分移動の概念を示したものである。この供試体では下部は飽和状態にあるが上部に近づくとつれて不飽和状態となる。不飽和帯では、飽和部に近いところでは毛管流動を生じ上面付近まで水分を移動させるが、上面近傍では周辺環境にもよるが乾燥帯となり、この部分で水分は液相から気相(水蒸気)に相変化して供試体外部へ拡散することとなる。ここで、下面からの水圧 p は供試体内の飽和帯の厚さを決定するのみであり、水分の移動には直接的には関与はしない。ちなみに、一般的な透水試験においてダルシー流が成立するのは、供試体全体が飽和状態となる場合に限られることになる。

また、後述の実験結果の評価において、同図の概念において以下のような仮定を与える[4]。

- ①毛管帯での蒸発は微量であり、蒸発は乾燥帯と毛管帯の界面で集中的に発生する。
- ②乾燥帯と毛管帯の界面は、明瞭な2層モデルであるとする。
- ③内部の微小空隙での水の蒸発潜熱の影響は無視できるものとし、乾燥帯での温度変化はないものとする。

このような仮定により、コンクリート中の水分の移動速度は乾燥帯の厚さと蒸発速度によって決まり、水圧は間接的に飽和帯の厚さのみに関与することになる。

*1 (株)熊谷組 エンジニアリング本部 原子力・エネルギー部係長、工博(正会員)

*2 (株)熊谷組 エンジニアリング本部 原子力・エネルギー部(正会員)

*3 (株)熊谷組 技術開発本部 豊川技術部(正会員)

*4 (財)原子力環境整備センター 研究第2部課長

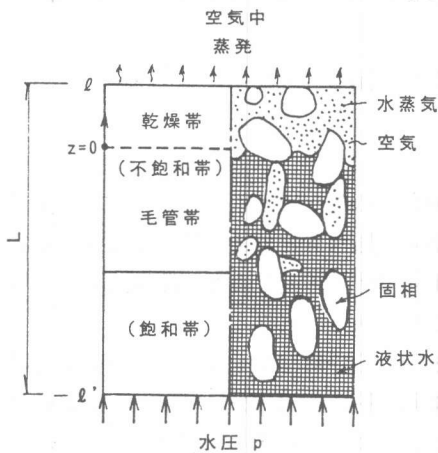


図-1 コンクリート内の水分移動の概念

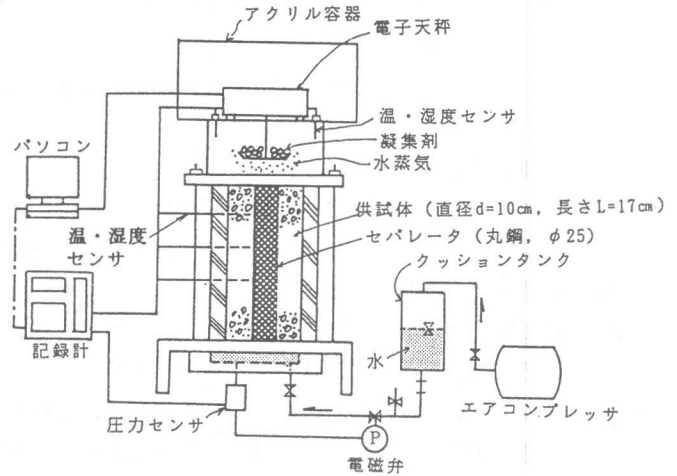


図-2 実験装置の概要 (セパ-コンクリート)

3. 実験方法

本試験は、水を供試体下面から加圧注入し、上面より蒸発する水蒸気としての水分量を測定するものである。本試験で測定できる供試体は、上面より水分が液状水として直接浸出しないものに限られるが、止水欠陥がなくW/Cがあまり大きくない密実なコンクリートであればそのほとんどがこの状況に該当すると考えられる。

3. 1 試験装置

試験装置の概要を図-2に示す。供試体は、コンクリート円柱(直径 $d=10\text{cm}$ 、高さ $L=170\text{cm}$)を用いた。本装置は、供試体の下面から水を加圧注入する構造となっており、水圧は $p=0.196\text{MPa}$ (2.0kgf/cm^2)とした。試験法は、基本的にはベンチレーション法を適用した[5]。供試体上面から浸出する水蒸気水分は、上部に設けた透明アクリル容器(以後容器と称する)で外部環境と遮断して捕捉した。水分量の測定は、容器内の湿度変化から換算する方法(A法)と凝集剤に水蒸気を吸収させてその重量変化を測定する方法(B法)を採用した。ここで、凝集剤はシリカゲルを用いたが、急激な吸湿を避けるためにビニール袋に微小孔を多数あけたものに入れて使用した。測定は、容器内外の温・湿度と供試体上面より30, 70, 110mmの位置の供試体内温・湿度及び凝集剤の重量をそれぞれ温・湿度センサー($-10\sim 60^\circ\text{C}$; $\pm 0.5^\circ\text{C}$, $20\sim 95\%\text{RH}$; $\pm 3\%\text{RH}$, 直径 $\phi 8\text{mm}$)及び電子天秤(最小表示 0.01gf)により行い、記録計及びパソコンにより自動記録した。

写真-1は、実験装置全体の写真である。

3. 2 試験手順及び試験ケース

まず、供試体は打設後4週経過したものを7日間水中養生し、つぎに全体にエポキシ樹脂を塗布して約4週間の封缶養生を行った。試験前に両端を切断・成形して実験装置にセットし、下面より所定の圧力を作用させた。この状態で2~3日放置した後、上部に容器を被せて測定

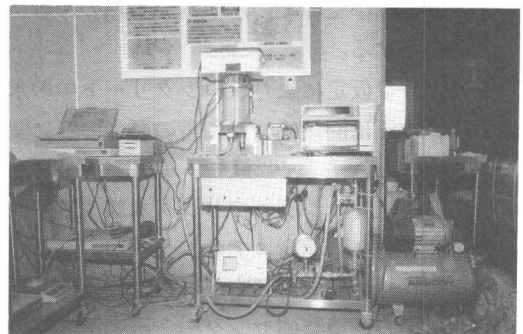


写真-1 実験装置の概要

表-1 コンクリートの配合

供試体名	G _{max} (mm)	Sl (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kgf/m ³)					
						W	C	S	G	混和剤	AE助剤
豆砂利コンクリート	10	8 ± 1.5	4 ± 1	40	60	187	477	866	600	1.193	0.0286
モルタル	—	—	4 ± 1	40	—	254	651	1173	—	1.628	0.0391
普通コンクリート	20	8 ± 1.5	4 ± 1	40	44	165	420	757	1004	1.050	0.0252

を開始した。測定期間は、A法の場合は、早期に容器内が高湿度となるため数時間程度、B法の場合は1週間程度とした。

試験ケースは、A法は豆砂利コンクリート、モルタルの2ケース、B法は普通コンクリートと図-2に示したようにセパレータとしてφ25mmの丸鋼を設置した普通コンクリート(セパコンクリートと称する)の2ケースについて実施した。コンクリートの配合は、表-1に示したとおりである。

4. 実験結果と考察

実験結果を検討するに当たっては、まず測定データを評価するために必要な諸係数を検討し、つぎに試験結果を整理して考察を加えることとする。

4.1 評価係数の検討

まず、A法での容器内の温・湿度の経時変化から水分量(マスフラックス密度 J_v)への換算は理想気体の関係より次式によって求める[6]。

$$J_v = \frac{(\rho_{v2} - \rho_{v1}) V}{A(t_2 - t_1)} = 2.166 \times 10^{-5} \frac{\Delta H p_{vs} \cdot V}{A \cdot \Delta t \cdot T} \quad (1)$$

ここで、 J_v : 水蒸気フラックス密度(kg/m²s), ρ_v : 水蒸気の密度(kg/m³), V : 容器の体積(5.06 × 10⁻⁴ m³), A : 供試体の表面積(7.854 × 10⁻³ m²), t : 時間, H : 相対湿度, p_{vs} : 飽和水蒸気圧, T : 絶対温度, Δ : 増分, であり、添字1, 2は初期変化での増加過程での任意の時間での値を示している。

一方、B法においては重量変化はそのまま水分の浸出量と考え、次式により J_v を求める。

$$J_v = \Delta W / (\rho_w \cdot A \cdot \Delta t) \quad (2)$$

ここで、 ΔW : 凝集剤の重量変化量, ρ_w : 水の密度、である。

つぎに、透水性の評価は、上述のモデル化の仮定から水分の蒸発は乾燥帯で生じるものと考えて、水蒸気拡散係数 D (m²/s)を次式により求める[7]。

$$D = \frac{J_v R_v T \ell}{P \cdot \ln \{ (P - p_{v1}) / (P - p_{v0}) \}} \quad (3)$$

ここに、 R_v : 水蒸気のガス定数(461.64 Pa/kg K), ℓ : 乾燥帯の厚さ, P : 湿り空気的全圧

(101.3 kPa), p_v : 水蒸気の分圧(Pa), であり、添字 0 は乾燥帯下面 (図-1 の $z=0m$; 飽和水蒸気圧), 1 は供試体上面 ($z=l$) での分圧を示す。

一方、参考のために乾燥帯での水分の蒸発機構を考えず、供試体内は飽和帯であり、ダルシー流により微量の液状水が浸出しているものとすれば、透水係数は次式により求められる。

$$k = J_v / (\rho_w i) \quad (4)$$

ここに、 i : 動水勾配 (=20/0.17=117.65) である。

以上の評価係数を用いて実験結果を検討する。

4. 2 結果と考察

まず、図-3 は供試体内の湿度分布の変化を示したものである。これより、普通コンクリートでは、初期の内部湿度は60~70%程度と比較的小さいが、豆砂利コンクリート及びモルタルでは80~100%と大きくなっていることがわかる。これからすると、少なくとも普通コンクリートとモルタルでは、下面付近を除いて不飽和状態であることが推察できる。また、経時的には容器内の湿度上昇(後述)に伴って内部湿度も若干増大する傾向にあることが判読できる。これらの結果から初期での乾燥帯の厚さを推定すると、普通コンクリートでは0.10~0.20m, 豆砂利コンクリートでは0.01~0.03m, モルタルでは0.10m程度と考えられる。また、実験中の供試体上面はいずれも液状水の浸出はなく乾燥状態にあった。

図-4, 5 は、A法における容器内外の温度・湿度の経時変化を初期の10時間について示したものである。豆砂利コンクリート及びモルタルでの容器内の湿度は、概ね初期の3~4時間で終息状態に達していることが認められる。マスフラックス密度は、同図の初期の湿度上昇勾配から上述の式(1)により求めることができる。また、乾燥厚さ l と容器内の湿度上昇時の平均湿度を決めれば式(3)により水蒸気拡散係数 D を算定することができる。ただし、初期の供試体内湿度及び容器内湿度が非定常変化しているため、精度は必ずしも十分ではない。

つぎに、B法を適用したときの容器内外の温・湿度の経時変化を図-6, 7に示す。また、図-8は、凝集剤の吸収量(浸出量)の経時変化を示したものである。まず、容器内の湿度に注目すると、外部では変動が大きいが、容器内では初期に急激に減少してその後は相対湿度20~35%程度で安定していることがわかる。これは、初期には容器内の湿気を凝集剤が吸収し、その後は供試体より浸出した水蒸気を吸収したものと考えられる。一方、凝集剤の吸収量の変化についてみると、初期の2~3日間程度はほとんど変化は認められないが、その後は湿度も安定し水蒸気分圧勾配が大きくなることによって、吸収量は線形増加している。測定初期は、凝集剤が容器内にあった湿気を吸収するものの、その量は極めて微量(1/1000cm³オーダ)であるため吸収量に表れてきていないものと考えられる。結局、B法は測定期間を長くとれば、十分な精度の浸出量測定が可能であることになる。

表-2は、これらの実験より得られた結果を整理したものである。同表には、本実験供試体では蒸発フラックスが支配的であるが、従来の透水試験結果と比較するため透水係数換算値を併せて示している。

まず、コンクリート表面からの水分の蒸発速度、すなわちフラックス密度 J_v を見てみると、 $J_v = 1.16 \times 10^{-8} \sim 1.23 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ ($\approx 1 \sim 11 \text{ m} \ell / \text{m}^2 \text{ day}$) となっている。また、それより求めた水蒸気拡散係数は $D = 1.92 \sim 3.82 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ となった。乾燥厚さの問題はあるが別途薄

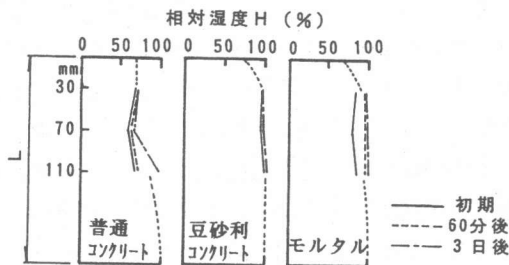


図-3 供試体内の湿度分布

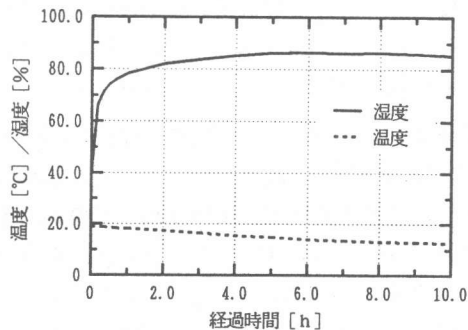


図-4 A法の豆砂利コンクリートにおける容器内の温度・湿度の経時変化

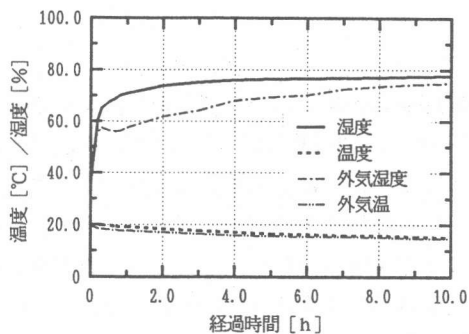


図-5 A法のモルタルにおける容器内の温度・湿度の経時変化

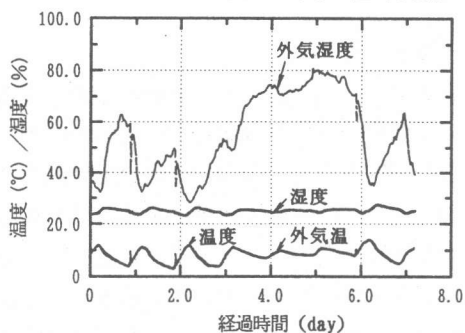


図-6 B法の普通コンクリートにおける容器内の温度・湿度の経時変化

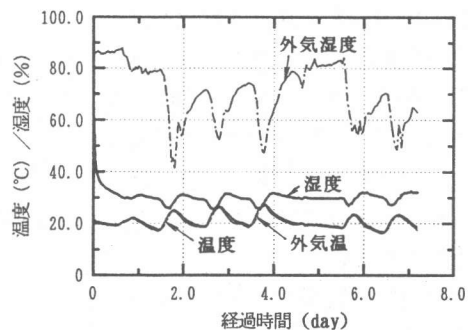


図-7 B法のセパコンクリートにおける容器内の温度・湿度の経時変化

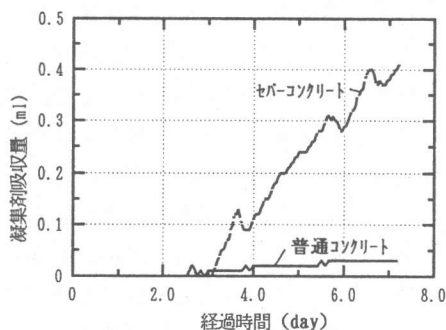


図-8 B法における凝集剤吸収量の経時変化

表-2 実験結果

供試体 (測定法)	平均温度 T (°C)	乾燥帯 の厚さ ℓ (m)	z=0(H=100%) の水蒸気分圧 p _{v,0} (Pa)	z=ℓの 平均湿度 H (%)	z=ℓの水 蒸気分圧 p _{v,ℓ} (Pa)	フラスコ 密度 J _v (kg/m ³ s)	水蒸気拡散 係数 D (m ² /s)	水蒸気拡散試験 より求めたD (m ² /s)	透水係数 k (m/s) * 参考値
豆砂利コンクリート (A法)	18.5	0.03	2130.4	71.9	1531.8	2.89× 10 ⁻⁸	1.92× 10 ⁻⁷	2.77~8.84× 10 ⁻⁷	2.46× 10 ⁻¹³
モルタル (A法)	19.5	0.10	2267.6	65.0	1473.9	2.25× 10 ⁻⁸	3.76× 10 ⁻⁷	6.39~8.61× 10 ⁻⁷	1.91× 10 ⁻¹³
普通コンクリート (B法)	8.0	0.15	1072.3	24.0	257.3	1.61× 10 ⁻⁸	3.82× 10 ⁻⁷	3.71~4.54× 10 ⁻⁷	1.37× 10 ⁻¹³
セパコンクリート (B法)	20.0	—	2338.1	32.0	748.2	1.23× 10 ⁻⁷	—	—	1.04× 10 ⁻¹²

板を用いて行った水蒸気拡散試験結果と比較的よく一致している。一方、透水係数は、 $k = 1.37 \times 10^{-13} \sim 1.04 \times 10^{-12} \text{m/s}$ となっている。これは、これまでにアウトプット法により測定されている $W/C=40\%$ 程度の通常のコンクリートのオーダとよく一致している[8]。また、本実験で用いた普通コンクリートと同じ配合の円柱供試体を用いてインプット法により測定した透水係数 $k = 1.2 \times 10^{-13} \text{m/s}$ ともよく一致している。しかし、本実験結果では圧力勾配による水分の移動より表面での蒸発速度の方が早いため、真の透水係数はこの値よりさらに小さくなるはずである。データ数が少ないので確定的なことは言えないがこのことはダルシー則を前提とする従来の透水試験法の評価には限界があることを示唆しているものと考えられる。また、このことに関しては、福原らは透水係数が 10^{-10}m/s 以下では、コンクリートの浸出面近傍は不飽和となり蒸発フラックスが卓越してくることを示唆している[2]。

5. まとめ

本研究では、コンクリート表面からの水分蒸発過程に焦点を当て、その蒸発量を測定する方法として2種類の方法を提案し、いくつかの供試体を用いて実験を試みた。その結果、A法(蒸発水分量を閉塞された容器内の湿度の上昇量より換算する方法)では、環境条件が経時変化することと短時間(数時間)で蒸発が平衡状態となることといった精度上の問題はあがあるが、極めて微量な蒸発量を短時間で測定するには有効な方法であることが示唆された。一方、B法(蒸発水分量を閉塞容器内の凝集剤に吸収させる方法)では、測定に時間を要する(数日~数十日)が、境界条件は安定しやすく、精度のよい測定が可能であることが認められた。

今回の実験では、 W/C の小さい密実なコンクリートを用いて実験を行ったが、コンクリート表面からの水分蒸発量(フラックス密度)は、 $1.16 \times 10^{-8} \sim 1.23 \times 10^{-7} \text{kg/m}^2 \text{s}$ ($1 \sim 11 \text{ml/m}^2 \text{day}$)であった。また、水蒸気拡散係数は $D = 1.92 \sim 3.82 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ となり、別に行った水蒸気拡散試験の結果と比較的よく一致した結果となった。他方、コンクリート内の水分状態に関係なくダルシー則を仮定して透水係数を求めると、 $k = 1.37 \times 10^{-13} \sim 1.04 \times 10^{-12} \text{m/s}$ となった。この透水係数は、 W/C が40%程度の通常のコンクリートのそのオーダと一致した。しかし、このことから逆にコンクリートの透水性評価において、従来あまり問題とされていなかったが浸透フラックスと蒸発フラックスの区別が必要であることを示唆した。

今後は、ここで提案した測定方法をさらに実際の構造物へ展開し、コンクリート表面からの蒸発量及び透水性の評価法として確立したいと考えている。

参考文献

- [1] 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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.631~636，1992.
- [2] 福原輝幸・佐藤邦明：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，地下空間利用シンポジウム1992，pp.219~226，1992.6.
- [3] 佐藤邦明・伊藤 洋・坂口雄彦：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，土木学会第45回年講Ⅲ，pp.814~815，1990.9.
- [4] 福原輝幸・佐藤邦明・S.Bories：蒸発に伴う乾燥層の発達過程と蒸発量予測のための簡便解法，水工学論文集，第35巻，pp.9~14，1991.2.
- [5] Brewitz, W. et al. : The ventilation test, NAGRA Bulletin, Spesial Edition, pp.46~49, 1988.
- [6] 中村泰人ほか：新建築学大系10(環境物理)，彰国社，pp.114~127，1979.
- [7] 伊藤 洋・前村辰二・坂口雄彦：水蒸気拡散法によるコンクリートの透水性評価試験について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.733~738，1992.
- [8] 例えば，岡田清・六車熙編：コンクリート工学ハンドブック，pp.568~571，1987.