

報告

[1125] 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

正会員 伊藤 洋 (熊谷組 原子力・エネルギー部)

正会員○前村辰二 (熊谷組 技術開発本部)

正会員 坂口雄彦 (熊谷組 原子力・エネルギー部)

1. はじめに

コンクリートの透水試験には、ダルシー則に基づいたアウトプット法やインプット法などが通常用いられている^[1]。しかし、これらの方法は、試験方法が煩雑であり、アウトプット法では計測期間が長期間にわたる上、流出量が微量である場合には測定精度が問題となる。また、インプット法は、透水の評価が難しいとされている^[1]。

本研究では、より簡便なコンクリートの透水試験法を確立することを目的として、建築材料の透湿性評価に用いられている水蒸気拡散法^[2]を応用した透水性評価試験法を適用し、コンクリート、モルタル、砂などの数種の試料を用いた実験を試みた。その結果、本試験法がコンクリートの透水性評価試験として適用できる足掛かりを得たと思われたので、ここに報告する。

2. 試験方法の概要

本試験は図-1に概要を示すように水を水蒸気の状態にして、供試体内を通過させ、その透過性を測定しようとするものである^[3]。ここで、水蒸気(透湿)は水(透水)と流体の性質は異なるが、基本的には透過抵抗性は供試体内の流路空隙形態によって決まるものであり、両者には相関性があるものと考えられる。

2.1 試験装置および供試体

試験装置は、図-1に示すとおりであり、薄い円柱形供試体を挟むことのできる単純な容器(以後カップと称す)と乾燥炉、及び電子天秤のみで試験が可能となる。カップは錆等の不純物の発生・混入をふせぐためアルミ製とした。また、供試体とカップの接触面には、耐熱性ゴムパッキンを

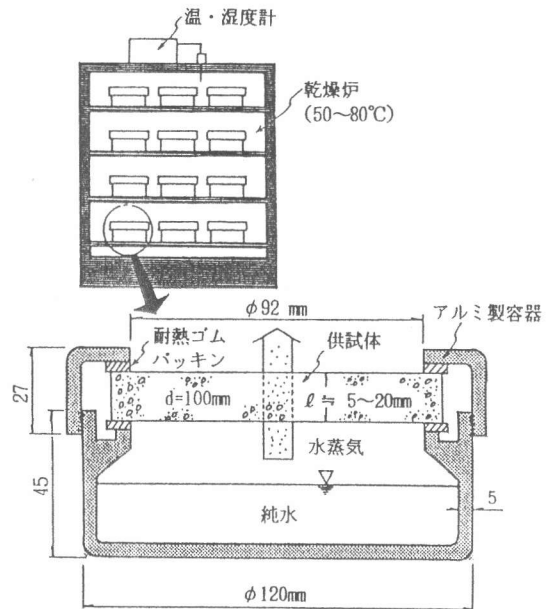


図-1 水蒸気拡散試験装置の概略

表-1 供試体の示方配合

供試体名	Gmax (mm)	Sl (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
						W	C	S	G	Ad1	Ad2
普通コンクリート	20	8±1.5	4±1	40	44	165	420	757	1004	1.050	0.0252
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	—	254.5	651	1173	—	1.628	0.0391

取り付け、側面からの水蒸気の漏洩を防いでいる。供試体は、直径 $d = 10\text{cm}$ 、厚さ $\ell = 1.5 \sim 2.5\text{cm}$ 程度に成形する。ここで供試体の透過対象となる有効面積 A はゴムパッキンの内径をとり、 $A = 60.82\text{cm}^2$ ($d' = 8.8\text{cm}$) とする。ただし、珪砂については特殊なメッシュ皿を用いたため、 $A = 63.62\text{cm}^2$ ($d' = 9.0\text{cm}$) とする。

2. 2 試験方法および試験ケース

カップ内に純水（市販のイオン交換水）を 150cm^3 程度入れ、上下面にゴムパッキンを配置して供試体を置き、上蓋をねじ込んで固定する。供試体には予め 80°C で 24 時間乾燥したもの（初期乾燥状態）と試験直前まで 20°C で 7 日間水中養生しておいたもの（初期湿潤状態）を用いた。試験の手順は以下のとおりである。まず、カップ全体の重量を電子天秤により測定する。次に、この供試体をセットしたカップ（写真-1 参照）を所定の温度に設定した乾燥炉内に設置する。乾燥炉内の温度は $T = 50^\circ\text{C}$ (323.15K) と 80°C (353.15K) に設定した。この時の相対湿度は $H = 8.3 \sim 8.9\%$ である（測定された実際の炉内温度、湿度は後述の表-2 参照）。一方、カップ内は小閉空間で加温状態にあり十分に水分が蒸発していると考え、カップ内湿度は $H = 100\%$ とみなす。この状態で経時的にカップを乾燥炉内より取り出して、全体重量を測定する。この時、減少重量がカップ内の純水が水蒸気として供試体内を通過した量（重量）となる。

試験は、表-2（後述）に示したようにコンクリート、モルタル、豆砂利コンクリート（配合は表-1 参照）、ポーラスコンクリート、珪砂を用い、乾燥炉内温度および供試体初期状態を変えて、合計 19 ケースについて行った。

3. 水蒸気拡散に係わる水理パラメータの算定式

水蒸気拡散を評価するに当たっては、透水係数に対応するような水理パラメータを試験結果より算定する必要がある。そこで、ここでは以下の仮定を設けて、3 つの水理パラメータの算出を行う。

仮定条件：① 供試体内は毛管水等の液相水分量が少なく、水分の移動は気相水分（水蒸気）で生じるものとする。② 系は等温・定常状態とする。③ 水蒸気および乾燥空気は理想気体とする。④ 湿り空気の全圧を P (Pa)、乾燥空気の分圧を p_a (Pa)、水蒸気分圧を p_v (Pa) とすると、 $P = p_a + p_v$ であり、図-2 のモデルに示したように湿り空気の総圧は一定であるとする（ $\nabla P = 0$ ；ダルトンの法則、ここでは、標準大気圧をとり、 $P = 101.3\text{KPa} = 760\text{mmHg}$ とする。）

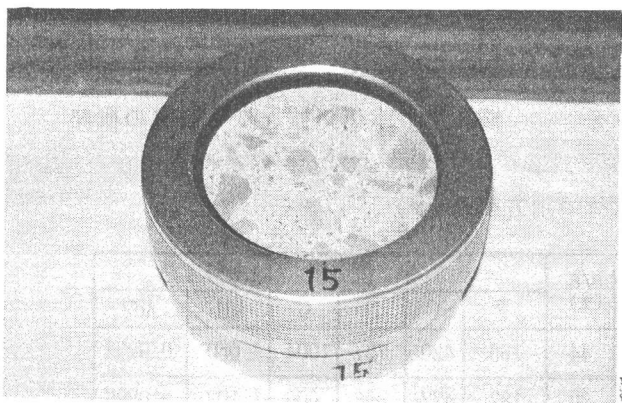


写真-1 カップのセット状況

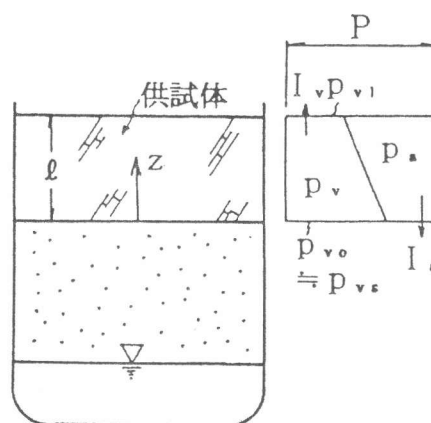


図-2 水蒸気拡散の概念モデル

3. 1 湿気伝導率による評価^{[3], [4]}

水蒸気の透過輸送は、試験容器内外の水蒸気分圧勾配に比例すると考えると、単位時間・単位面積当たりの気相水分（水蒸気）マスフラックス密度 J_v ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$) は、湿気伝導率 λ ($\text{kg}/\text{m s Pa}$) を用いて以下のように表せる。

$$J_v = \frac{m_v}{A} = -\lambda \nabla p_v = \lambda \frac{p_{v0} - p_{v1}}{\ell} \quad (1)$$

ここに、 m_v : 単位時間当たりの気相水分マスフラックス密度 (kg/s)、 A : 供試体の透過面積 (m^2)、 ℓ : 供試体の厚さ (m) であり、添字 0 は供試体下面 ($z = 0$)、1 は供試体上面 ($z = \ell$) での分圧値を示している。ここで、水蒸気分圧 p_v は、相対湿度 H (%) の定義から、

$$p_v = H p_{vs} / 100 \quad (2)$$

となる。 p_{vs} : 飽和水蒸気圧 (Pa) であり、本実験では $p_{vs} = 11,865 \text{ Pa}$ (322.35K)、 $46,811 \text{ Pa}$ (352.85K)、 $49,530 \text{ Pa}$ (354.25K) とする^[5]。

3. 2 水蒸気拡散係数による評価^{[6], [7]}

上述の評価法は簡便であるが、実際にはカップ内の空間は閉塞小空間であり、加えて、ダルトンの法則から容器内の全圧は一定である。つまり、図-2 に示したように空気フラックスは、下向き拡散成分と上向きの流動成分（対流）が釣り合う必要がある。したがって、水蒸気の上方向への移動は、濃度勾配による拡散に加えこの対流による輸送も生じていると考えられる。

まず、乾燥空気の下方向への拡散量 I_a ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$) はフィックの法則により以下のように書ける。

$$I_a = -D \partial C_a / \partial z = -D / R_a T \cdot dp_a / dz \quad (3)$$

ここに、 D : 供試体内のガス拡散係数 (m^2/s)、 C_a : 単位体積当たりの乾燥空気の質量濃度 (kg/m^3)、 T : 絶対温度 (K)、 z : 座標、 R_a : 乾燥空気のガス常数 ($\text{Pa m}^3/\text{kg K}$) ; $R_a = R / M_a = 287.15$ 、 R : 一般ガス常数 ($8,316.96 \text{ Pa m}^3/\text{kmol K}$)、 M_a : 乾燥空気の見かけの分子量 ($28.964 \text{ kg}/\text{mol}$) である。

式(3)によって表された空気の拡散量 I_a は、上方への対流による移動と釣り合っているとすれば、供試体内の空気のマスフラックス密度 J_a は、

$$J_a = I_a + \rho_a v = 0 \quad (4)$$

となる。

ここに、 J_a : 単位時間・単位面積当たりの乾燥空気のマスフラックス密度 ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$)、 ρ_a : 乾燥空気の密度 (kg/m^3)、 v : 対流による上向きの移動速度 (m/s) である。

式(4)に式(3)を代入し、 ρ_a を理想気体の状態方程式によって分圧表示にすると、 v は以下のように表せる。

$$v = D / p_a \cdot dp_a / dz \quad (5)$$

水蒸気の上方向への拡散量 I_v は、式(3)と同様にして、

$$I_v = -D / R_v T \cdot dp_v / dz \quad (6)$$

となる。

ここに、 R_v : 水蒸気のガス常数 ($\text{Pa m}^3/\text{kg K}$); $R_v = R/M_v = 461.64$, M_v : 水蒸気の分子量 ($=18.016\text{kg/kmol}$) である。

これより、水蒸気のマスフラックス密度 J_v は、拡散量と対流による総和となり、ダルトンの法則 ($dp_a/dz = -dp_v/dz$) を用いて整理すると、以下ようになる。

$$J_v = I_v + \rho_v v = -D/R_v T \cdot P / (P - p_v) \cdot dp_v/dz \quad (7)$$

ここに、 ρ_v : 水蒸気の密度 (kg/m^3) である。

式(7)を $z = 0 \sim \ell$ で積分すると、

$$J_v = \frac{D P}{R_v T \ell} \ln \frac{P - p_{v1}}{P - p_{v0}} \quad (8)$$

となる。

3.3 水蒸気の物質伝達率による評価^[7]

基本的な考え方は、上述の3.2と同じである。

ここでは、伝熱においてニュートンの冷却則により熱伝達率を定義するのと同様に、水蒸気の質量濃度 (C_v) の差に比例して水蒸気が輸送されるとし、その比例定数を物質伝達率 h (m/s) と定義すると以下のように書ける。

$$J_v = h (C_{v0} - C_{v1}) = \frac{h}{R_v T} (p_{v0} - p_{v1}) \quad (9)$$

式(9)と式(8)を対応させると、水蒸気伝達率 h は、以下のように書ける。

$$h = \frac{D P}{\ell (p_{v0} - p_{v1})} \ln \frac{P - p_{v1}}{P - p_{v0}} \quad (10)$$

4. 試験結果と考察

表-2に試験結果より得られた湿気伝導率 λ , 拡散係数 D , 物質伝達率 h をまとめて示す。評価係数に着目すると、湿気伝導率 λ は $10^{-12} \sim 10^{-11} (\text{kg/m s Pa})$ 、拡散係数 D は $10^{-7} \sim 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$ 、物質伝達率 h は $10^{-5} \sim 10^{-3} (\text{m/s})$ のオーダーとなっている。また、透水試験 (アウトプット法) より得られた透水係数 k を併せて示す。ただし、コンクリート、モルタル、豆砂利コンクリ

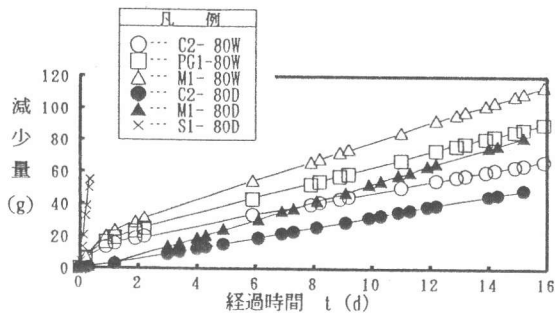


図-3 設定温度80°Cにおけるカップ内水の減少量 (水蒸気拡散量) の経時変化

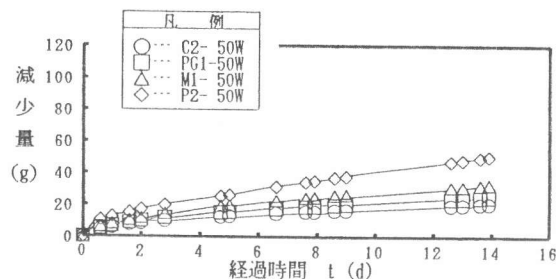


図-4 設定温度50°Cにおけるカップ内水の減少量 (水蒸気拡散量) の経時変化

表-2 試験ケースと結果

供試体名	実験ケース	供試体初期状態	温度 T (K)	湿度 H (%)	供試体の厚さ l (m)	気相水分蒸気密度 J_v ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	透水係数 k (m/s)	湿気伝導率 λ ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$)	拡散係数 D (m^2/s)	物質伝達率 h (m/s)	
普通 コンクリート	C1-80W	湿潤	354.25 (81.1°C)	8.3	0.0199	8.374×10^{-6}	— *1)	3.67×10^{-12}	4.27×10^{-7}	3.02×10^{-5}	
	C2-80W				0.0216	6.371×10^{-6}		3.03×10^{-12}	3.53×10^{-7}	2.29×10^{-5}	
	C1-50W		322.35 (49.2°C)	8.9	0.0199	1.375×10^{-6}		2.53×10^{-12}	3.52×10^{-7}	1.89×10^{-5}	
	C2-50W				0.0216	1.514×10^{-6}		3.03×10^{-12}	4.21×10^{-7}	2.09×10^{-5}	
	C1-80D	乾燥	352.85 (79.7°C)	8.7	0.0199	7.167×10^{-6}		3.34×10^{-12}	3.96×10^{-7}	2.73×10^{-5}	
	C2-80D				0.0216	6.233×10^{-6}		3.15×10^{-12}	3.74×10^{-7}	2.38×10^{-5}	
豆砂利 コンクリート	PG1-80W	湿潤	354.25	8.3	0.0205	9.018×10^{-6}	5.09	4.07×10^{-12}	4.74×10^{-7}	3.25×10^{-5}	
	PG2-80W				0.0136	8.935×10^{-6}		2.68×10^{-12}	3.11×10^{-7}	3.22×10^{-5}	
	PG1-50W		322.35	8.9	0.0205	1.817×10^{-6}	$\times 10^{-14}$	3.45×10^{-12}	4.80×10^{-7}	2.50×10^{-5}	
	PG2-50W				0.0136	1.774×10^{-6}		2.23×10^{-12}	3.11×10^{-7}	2.44×10^{-5}	
モルタル	M1-80W	湿潤	354.25	8.3	0.0204	1.144×10^{-5}	4.01	5.14×10^{-12}	5.98×10^{-7}	4.12×10^{-5}	
	M2-80W				0.0201	1.202×10^{-5}		5.32×10^{-12}	6.19×10^{-7}	4.33×10^{-5}	
	M1-50W		322.35	8.9	0.0204	2.504×10^{-6}		$\times 10^{-14}$	4.73×10^{-12}	6.58×10^{-7}	3.45×10^{-5}
	M2-50W				0.0201	2.552×10^{-6}			4.75×10^{-12}	6.61×10^{-7}	3.52×10^{-5}
	M1-80D	乾燥	352.85	8.7	0.0204	1.067×10^{-5}		5.09×10^{-12}	6.04×10^{-7}	4.06×10^{-5}	
	M2-80D				0.0201	1.249×10^{-5}		5.88×10^{-12}	6.97×10^{-7}	4.76×10^{-5}	
ポーラス コンクリート	P1-50W	湿潤	322.35	8.9	0.0236	4.371×10^{-6}	3.5	9.54×10^{-12}	1.33×10^{-6}	6.02×10^{-5}	
	P2-50W				0.0225	4.873×10^{-6}		$\times 10^{-9}$	1.01×10^{-11}	1.41×10^{-6}	6.71×10^{-5}
珪砂	S1-80D	乾燥	352.85	8.6	0.0053	2.979×10^{-4}	1.7×10^{-4}	3.69×10^{-11}	4.38×10^{-6}	1.13×10^{-3}	

*1) 透水試験 (アウトプット法、水圧 2.94 MPa) では測定不能

*2) 透水試験 (アウトプット法、水圧 2.94 MPa) で測定した値 (ただし、浸出量が微量のため精度は劣る)

ートの供試体についてはアウトプット法 (水圧 2.94 MPa で約 1 ヶ月間加圧) によっても漏水量は極めて少なく、精度のよい極低透水係数の算定には、あまり適していないことが示唆される結果となったが、豆砂利コンクリート及びモルタルについては一応透水係数値を求めて示した。

図-3 及び図-4 は、それぞれ設定温度 80°C 及び 50°C におけるカップ内水の減少量の経時変化の代表的な例を示したものである。図-3 より、経過時間 $t = 0 \sim 2$ 日程度の初期において供試体初期状態の違いによる影響がみられるが、その後は、共に線型増加している。このことは、供試体を透過する水蒸気拡散量は、経時的に非常に安定したものとなっていることを示しているものと考えられる。また、図-3 と図-4 を比較すると、蒸気圧差 (= 温度差) の小さい設定温度 $T = 50^\circ\text{C}$ (323.15K) の方が減少速度は小さくなっている。

図-5 は、測定温度 50°C と 80°C における評価係数を比較したものである。また、図-6 は、初期乾燥状態と初期湿潤状態の供試体における評価係数を比較したものである。これらより、評価係数は設定温度及び初期状態によらずほぼ同じ値となっていることが判読できる。つまり、本試験法では、初期状態及び設定温度の影響は小さく、特に考慮する必要はないものと考えられる。

図-7 は、評価係数 λ 、 D 、 h と透水係数 k の関係を示したものである。同図より、両者に比較的良い相関が認められ、本試験法による評価係数から透水係数がある程度推定し得ることが示唆される。

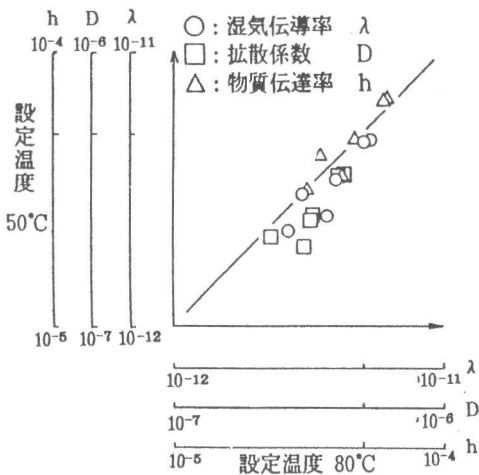


図-5 設定温度50°Cと80°Cにおける評価係数の比較

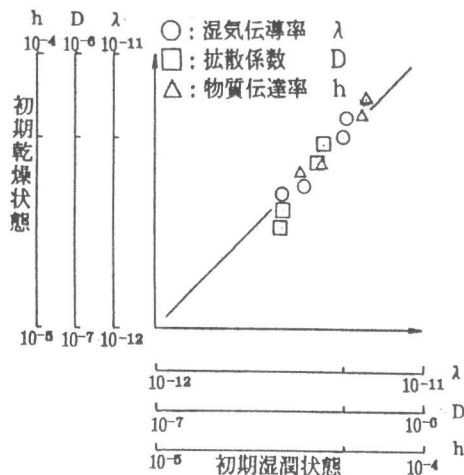


図-6 初期乾燥状態と初期湿潤状態における評価係数の比較

5. まとめ

本研究では、コンクリートを対象とした透水性評価法として、水蒸気拡散法を応用した簡便試験法を適用し、数種類の供試体を用いた試験を試みた。今回の試験では、まだ十分な試験データが得られているとは言えないが、本試験法は、少なくとも水蒸気の透過性に関しては、コンクリートのような極低透水性媒体であっても、十分な精度で測定・評価が可能であることが確認された。加えて、本試験方法による評価係数から透水係数が推定し得ることが示唆された。

本試験方法は、従来の方法と比較しても極めて簡便であり、特殊な試験装置等も不要でコスト的にも各段に安価である。また、試験期間も、初期乾燥状態で、乾燥炉の設定温度を $T = 80^{\circ}\text{C}$ (353.15K) 程度とすれば、数日程度で十分であり、水密性の高いコンクリートでも短期間で透水性の評価が可能となることがわかった。

今後、透水性の高いものから低いものまで、幅広い範囲のデータを蓄積し、さらに検討を進めて、本試験法を透水性評価試験として確立したいと考えている。

参考文献

- [1] 国分正胤編：土木材料実験，技報堂出版，pp.289～293，1986.9
- [2] JIS Z 0208（防湿包装材料の透湿度試験方法）
- [3] Dhir, R.K. et al. : Membrane curing of concrete : water vapour permeability of curing membranes, Magazine of Concrete Res., 41, No.149, pp.221～228, Dec.1989
- [4] 中村泰人ほか：新建築学大系10（環境物理），彰国社，pp.105～127，1979
- [5] 理科年表，丸善，p.388，p.481，1989
- [6] 福原輝幸ほか：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
- [7] ホールマン，J.R.（平田賢 監訳）：伝熱工学（下），丸善，pp.426～436，1982.3

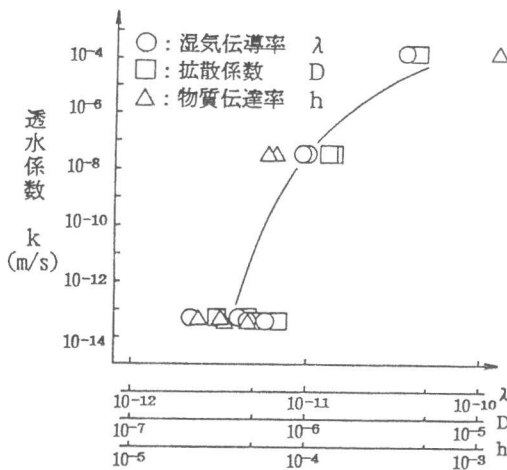


図-7 水蒸気拡散の評価係数と透水係数の関係