

# コンクリートの透気性の定量的評価に関する研究

## A STUDY ON THE QUANTITATIVE EVALUATION OF AIR PERMEABILITY OF CONCRETE

氏家 勲\*・長瀧重義\*\*

By Isao UJIKE and Shigeyoshi NAGATAKI

The objective of this study is to investigate the behavior of air flow through concrete due to a pressure difference, and to evaluate the air permeability of concrete quantitatively. Different mix proportions and curing conditions are used so as to detect the dominant factors affecting air permeability. It is found that the coefficient of air permeability can be used as an index of air permeability of concrete, and it can be quantitatively estimated by mean pore radius and porosity based on the volume of evaporated water. In addition, air permeability of concrete is found independent of the total capillary pores in concrete, but dependent on the dried capillary pores without moisture.

*Keywords: air permeability, Darcy's law, pore structure*

### 1. ま え が き

近年のコンクリート構造物は、コンクリートの材料、施工方法および設計方法の技術的進歩によりその適用の範囲も拡大しつつあり、最近では気密性を要求される構造物へ適用されることも少なくない。気密性を必要とする構造物の例としては原子炉格納容器、海水淡水化装置の缶体、下水処理タンクおよび薫蒸穀物サイロなどが挙げられる。これらのコンクリート構造物においては、有害物質の漏洩・拡散などの機能性の低下を防止する必要から、気密性に優れたコンクリートを使用しなければならない。このようにコンクリートの気密性は構造物の目的によっては等閑視できない性質である。

またコンクリートが耐久であるためには、コンクリートを侵食したり劣化の原因となる物質の移動をできるだけ少なくしなければならない。この物質移動は圧力、濃度、温度、電圧などの差がコンクリートに与えられることに起因し、その物質の移動速度はそれらの差の程度に加えてコンクリートの透過性にも左右される。それゆ

え中性化の原因である炭酸ガスあるいは鋼材の腐食因子である酸素のような気体が侵入する場合には、コンクリートの透気性はそのような耐久性低下に関する1つの指標とみなせる重要な特性であると報告されている<sup>1),2)</sup>。

既往のコンクリートの透気性に関する文献を概観すると、多くの場合コンクリートの透気性を透水性と同様にダルシー則を適用し透水係数に相当する透気係数を用いて評価している<sup>3)-5)</sup>。一般に水密性に優れたコンクリートは気密性にも優れ、したがってコンクリートの気密性を改善するには水密性と同様、水セメント比を低く抑え、単位水量を少なくし、締固めを十分に行う必要があるといわれている<sup>6)</sup>。しかしながら飽水状態のコンクリートが空気に対して事実上ほぼ気密である例にみられるように<sup>7)</sup>、コンクリートを透過する物質が液体と気体では異なった透過性を示しているにもかかわらず、コンクリートの透気性に関する研究は透水性に関する研究に比較して非常に少ないため、定まった試験方法もなく、十分な検討あるいは統一された評価はされていないように思われる。

以上のように、今後増加すると考えられる気密性を必要とするコンクリート構造物の機能を長期的に満足し、また、気体の侵入に対するコンクリートの耐久性を確保するためには、コンクリートの透気機構を明らかにし、

\* 正会員 宇都宮大学助手 工学部土木工学科  
(〒321 宇都宮市石井町 2753)

\*\* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科  
(〒152 目黒区大岡山 2-12-1)

さらにその予測方法を確立することが重要であると思われる。そこで本研究では、コンクリート自身の透気性を対象とし、コンクリートの相対する2つの面の間に圧力差が生じることによって流れる気体の基本的な性状に着目し、コンクリートの透気性の指標である透気係数について検討を加えるとともに、コンクリートの透気性に影響を及ぼす要因を明らかにし、それらの要因をコンクリート内部の空隙構造と関連づけてコンクリートの透気係数の定量的評価を行うことを目的とした。

2. 実験概要

セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材に川砂、粗骨材に砕石を用いた。セメントおよび骨材の諸性質を Table 1, 2 に示す。さらに混和材としてフライアッシュおよびシリカヒュームを用いた。Table 3 にフライアッシュおよびシリカヒュームの物理化学的性質を示す。本研究においてコンクリートの透気性に影響を及ぼす要因としては、水セメント比、混和材の種類および乾燥を取り上げた。コンクリートの示方配合を Table 4 に示す。なお、本研究ではコンクリートの透気性に及ぼす単位水量の影響が大きいことに着目し、フライアッシュを置換した場合は *s/a* によって、シリカヒュームを置換した場合はナフタリンスルホン酸塩系

の高性能減水剤によって、単位水量の補正を行わず、スランプが一定となるようにした。乾燥条件は、温度 20 ± 1°C で、湿度 85 ± 5 % R. H., 60 ± 5 % R. H. および 35 ± 5 % R. H. の高, 中, 低湿度の3通りとした。

供試体は 15×15×53 cm の曲げ強度試験用型枠に打設し、翌日脱型して、材令 28 日および 91 日まで水中養生を行った。水中養生終了後にコンクリートカッターで所定の長さに切断し、この後供試体は所定の面をシールし、透気試験を行うまで気中養生を行った。

透気試験は温度 20 ± 1°C の恒温室で行い、Fig. 1 に示す透気試験装置を用いて実施した。供試体は透気試験前日に、気密処理を行う面にグラインダーをかけた後、ア

Table 1 Physical and Chemical Properties of Cement.

Specific Gravity	Specific Surface (cm <sup>2</sup> /g)	Setting Time			Flexural Strength (MPa)				
		Mixing Water (%)	Initial Set (hr-min)	Final Set (hr-min)	3 days	7 days	28 days		
3.15	3350	28.3	2-47	3-59	3.43	4.90	6.66		
Compressive Strength (MPa)		Chemical Composition (%)							
3 days	7 days	28 days	ig. loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
14.7	25.1	40.0	0.6	21.6	5.3	3.0	64.9	1.3	2.2

Table 2 Physical Properties of Aggregates.

Aggregate	Specific Gravity	Absorption (%)	Fineness Modulus
Fine	2.63	1.56	2.21
Coarse <sup>1)</sup>	2.66	0.60	6.64

1) maximum size: 20mm

Table 3 Physical and Chemical Properties of Fly Ash and Silica Fume.

Kinds of Pozzolan	Specific Gravity	Fineness	Chemical Composition (%)								
			ig.loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Fly Ash	2.14	Blaine 2950cm <sup>2</sup> /g	2.0	53.6	23.9	5.0	8.0	1.8	1.4	-	-
Silica Fume	2.27	Particle size 1-2μ	6.4	82.6	1.7	0.6	0.3	2.2	1.0	1.6	2.9

Table 4 Mix Proportions and Properties of Fresh Concrete.

Kinds of Pozzolan <P>	W C+P (%)	s/a (%)	Water Content (kg/m <sup>3</sup> )	C C+P %'	Admixture		Slump (cm)	Air Content (%)
					AEA <sup>2)</sup>	SP <sup>3)</sup>		
---	40	42	187	0	0.028	0	8.2	4.3
	50	46	187	0	0.028	0	9.6	4.0
	60	48	187	0	0.018	0	7.0	3.9
	70	48	187	0	0.017	0	7.5	3.9
Fly Ash	40	44	187	10	0.050	0	8.4	3.8
	40	47	187	20	0.078	0	8.9	3.7
	40	49	187	30	0.114	0	11.0	3.8
Ash	40	53	187	50	0.154	0	12.0	3.7
	40	42	187	10	0.038	0.20	7.3	3.9
Silica Fume	40	42	187	20	0.043	0.40	7.2	4.2
	40	42	187	30	0.038	0.50	8.0	3.2

1) Percentage replacement cement by weight  
 2) Air-entraining agent : wt% of cement  
 3) Superplasticizer : wt% of cement

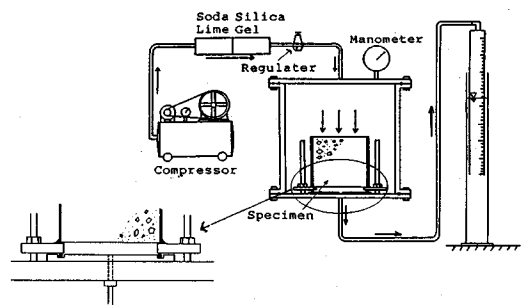


Fig. 1 Air Permeability Testing Equipment.

セトンで油、ごみ等を取り、中央に14×14 cmの穴を有する平滑な鋼板にエポキシ樹脂系接着剤で取り付けられた。この後エポキシ樹脂系接着剤を透気面以外の4側面にピンホール等が残らないよう、約1時間間隔で3回塗布した。気密処理を行った供試体は15×15 cmの透気面(供試体出口では14×14 cm)を有しており、透気方向がコンクリートの打ち込み方向と直角となるよう圧力容器にOリングを介して取り付けた。コンプレッサーから送られる空気に含まれる水分はシリカゲルで、炭酸ガスはソーダライムで除去した。これは炭酸ガスと水分を取り除いた空気を用いないとコンクリート内部の空隙が閉塞するため実験結果にばらつきを生じさせるとの報告があること<sup>3)</sup>、および常に同一条件の空気を試験に用いることによる。載荷圧力は、レギュレーターで調整して所定の空気圧を保持した。コンクリートを通過した空気はこれを水で置換する方法で集め、透気量は空気の流れが定常状態になったのちメスシリンダーの値を読み取り求めた。本実験においては透気量測定時間を定常状態後10時間とした。

3. 結果と考察

(1) コンクリートの透気係数

既往のコンクリートの透気性に関する研究では透気試験方法の相違および供試体形状の相違などから透気係数の算定式が異なっている<sup>3), 8), 9)</sup>。またそれら既往の研究のほとんどはコンクリートを透過する空気の流れに対してDarcy則が成り立つという仮定に基づいて透気係数を算定しているが、その確認はされていない。そこで本研究では、まず、Darcy則がコンクリートを透過する空気の流れに関して適用できるか否かについて検討する。

衆知のごとくDarcy則は実験的に求められたものであって流体が微細粒子で充満された空間や多孔体などの媒体中を流れるとき、見掛けの流速( $v$ )が圧力勾配( $\Delta P/\Delta x$ )に比例するというものであり、次式が定式化

されている<sup>10)</sup>。

$$v = -K(\Delta P/\Delta x) \dots\dots\dots(1)$$

なお、式(1)の右辺のマイナスは流体が( $\Delta P/\Delta x$ )の負の方向に向かって流れるためである。また見掛けの流速は流量を媒体の断面積で除したものである。式(1)の $K$ が透過率などによれば、流体の流れやすさを表わすものであり、コンクリートの透気性の場合、透気係数とよばれている。

Fig. 2はコンクリートを通過した空気の見掛けの流速と載荷圧力の関係を示す。見掛けの流速は載荷圧力が高くなるにつれて大きくなっているが、その関係は比例関係でなく載荷圧力の増加割合以上に見掛けの流速の増加割合が大きくなっている。また同一載荷圧力においては、見掛けの流速は供試体厚さが薄くなるにつれて大きくなっている。

コンクリートを透過する空気の流れがDarcy則に従うならば、見掛けの流速は圧力勾配に比例する。そこで圧力勾配を求めるためにはコンクリート中の圧力分布を知る必要がある。圧力分布は次のように導くことができる。まずコンクリート中の微小部分を考え、流体の流れる方向を一方方向( $x$ )とし、定常状態で流れているとする。

流体の密度を $\rho$ とすると流体の圧縮性を考慮した連続の方程式より (Fig. 3 参照)

$$\rho(\partial v/\partial x) + v(\partial \rho/\partial x) = 0 \dots\dots\dots(2)$$

となり、また温度を一定とすると気体の状態方程式より

$$\rho = (M/RT)P \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $P$ は圧力、 $M$ は気体の分子量、 $T$ は温度および $R$ は気体定数である。さらに運動方程式としてDarcy則を用いる

$$v = -K(\partial P/\partial x) \dots\dots\dots(4)$$

式(2)、(3)および(4)より式(5)が誘導される。

$$P \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)^2 = 0 \dots\dots\dots(5)$$

式(5)をコンクリートを均一とし、 $x=0$ で $P=P_1$ (載荷圧力)および $x=l$ で $P=P_2$ (大気圧)の境界条件を用いて解くとコンクリート中の圧力分布は次の式で表わされる。

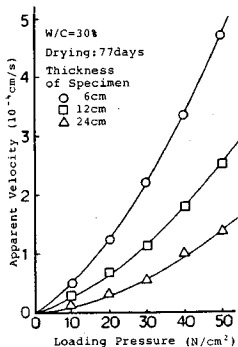


Fig. 2 Relationship between Apparent Velocity and Loading Pressure.

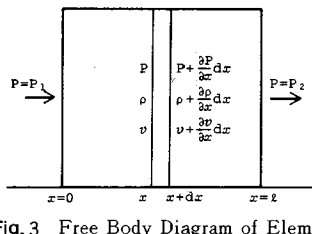


Fig. 3 Free Body Diagram of Element of Length  $dx$  and Boundary Condition.

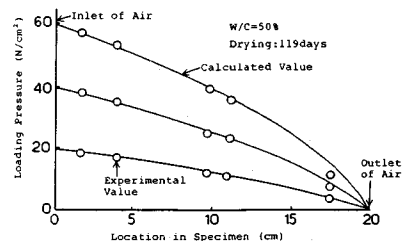


Fig. 4 Distribution of Pressure.

$$P = \left( \frac{P_2^2 - P_1^2}{l} x + P_1^2 \right)^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

Fig. 4 は供試体の側面に  $\phi 1 \times 2$  cm の穴をあけ圧力センサーを取り付けて測定したコンクリート内部の圧力分布を示す。図中の○印は実測値であり、実線は式(6)によって表わされる圧力分布である。圧力センサーより得られた実測値は式(6)より求めた計算値とよく一致している。つまりコンクリート内部の圧力分布は直線分布ではなく、式(6)で表わされる分布と考えてよい。この場合このように考えれば、圧力勾配は圧力差をとる位置によって変化することになる。そこで供試体出口( $x=l$ )における見掛けの流速が実験より得られることから供試体出口における圧力勾配と見掛けの流速との関係を Fig. 5 に示す。供試体出口における見掛けの流速は Fig. 2 に示した流速であり、供試体出口での圧力勾配は式(6)を微分することにより得られる。Fig. 5 からわかるように見掛けの流速は圧力勾配に比例しており、供試体厚さによらず一本の直線で表わされる。この直線の傾きが透気係数を表わすものである。

Fig. 5 の結果より本実験の範囲においては式(6)を微分し式(4)に代入することにより、次の式で透気係数が算出することができる。

$$K = \frac{2 l P_2 \gamma_A}{P_1^2 - P_2^2} \cdot \frac{Q}{A} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $K$ ：透気係数 (cm/s)、 $Q$ ：透気量 (cm<sup>3</sup>/s)、 $A$ ：透気面積 (cm<sup>2</sup>)、 $l$ ：供試体厚さ (cm)、 $P_1$ ：載荷圧力 (N/cm<sup>2</sup>)、 $P_2$ ：大気圧 (N/cm<sup>2</sup>)、 $\gamma_A$ ：空気単位体積重量 (1.182×10<sup>-5</sup> N/cm<sup>3</sup>) である。また  $\gamma_A$  は圧力を長さの次元で表わすために用いたものである。

Fig. 6 は載荷圧力および供試体厚さを変化させて行った透気試験より得られた透気係数を示す。コンクリートの透気係数は供試体厚さによらずほぼ同じ値となってい

るが、載荷圧力が大きくなるにつれて幾分小さくなっている。これは供試体出口からメスシリンダーに至るまでの流れの形状変化あるいは管の曲がりなどによって生じる形状損失を透気係数の算定に用いた式(7)において考慮していないためであると考えられるが、その変化の程度は変動係数にして約 10% であり、透気係数は載荷圧力によらずおおむね一定とみなせる。Fig. 6 の場合、コンクリートの透気係数は水セメント比によって一義的に定まっている。

Darcy 則の比例係数  $K$  (透水係数あるいは透気係数) は次元解析により、流体の粘性係数、密度および多孔体を構成する空隙の寸法、形状、分布ならびにそれらの連続性などによって定まる係数であるといわれている<sup>10)</sup>。透気試験に用いた空気はすべて同一条件であることから、本実験で得られる透気係数もコンクリートの内部構造により決定されるものである。一般に Darcy 則が成り立つためには、流れの慣性力が粘性力に比べて無視し得る程度に小さいことが必要であることから、Reynolds 数によって Darcy 則の成り立つことが判断できる。たとえば、土の浸透流において Darcy 則が適用できる範囲は数多くの実験結果から Reynolds 数 1~10 以下といわれている<sup>10), 11)</sup>。コンクリートの透気係数においてはそのような実験結果が少ないことから、Darcy 則の適用が可能な範囲を示す Reynolds 数は明らかではない。しかしながら、空気の動粘性係数、本実験で得られた最大の見掛けの流速および毛細管空隙の平均細孔径を用いて算出した Reynolds 数は 10<sup>-4</sup> 程度と小さく、また Fig. 4 ~ Fig. 6 に示した結果から、本実験の範囲においては Darcy 則が適用できるものと思われ、式(7)によって定義される透気係数をコンクリート自身の透気性の指標として用いてよいと結論される。

(2) コンクリートの配合が透気性に及ぼす影響

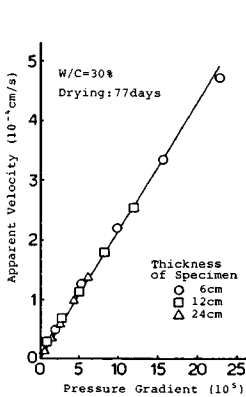


Fig. 5 Relationship between Apparent Velocity and Pressure Gradient.

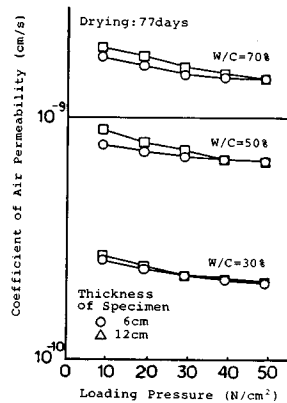


Fig. 6 Relationship between Coefficient of Air Permeability and Loading Pressure.

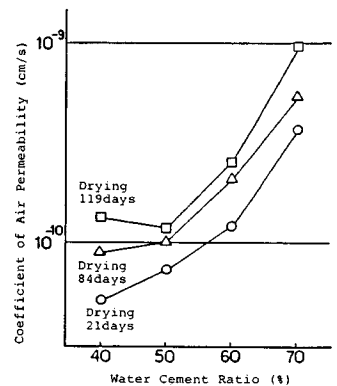


Fig. 7 Effects of Water Cement Ratio on Air permeability.

最初に水セメント比の違いがコンクリートの透気係数に及ぼす影響について検討を加える。ここで乾燥条件は温度  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度  $60 \pm 5\% \text{ R.H.}$  とし、各配合において乾燥日数を同一として透気係数を比較検討した。

Fig. 7は透気係数に及ぼす水セメント比の影響を示す。コンクリートの透気係数は水セメント比が増加するにつれて大きくなっている。しかも透気係数は対数目盛りであることから、水セメント比が大きくなるにつれて透気係数の増加割合はきわめて大きくなっている。このような関係は既往のコンクリートあるいはモルタルの透気性の研究においても報告されているが<sup>53), 12), 13)</sup>、これはコンクリートを透過する空気がコンクリートの透水性と同様に、主にコンクリート中の毛細管空隙を流れるためと考えられる。コンクリート中の毛細管の空隙構造は水セメント比および水和の程度により定まるといわれている。すなわち、水セメント比が小さくなるにつれてあるいは水和が進行するにつれて、毛細管空隙の量は少なくなり、また毛細管空隙は水セメント比の小さいものほど早く不連続な状態になると報告されている<sup>14)</sup>。この毛細管空隙量の減少と毛細管空隙の不連続性への移行がFig. 7において水セメント比が小さくなるにつれてコンクリートの透気係数が小さくなった原因の1つと考えられる。

次に、混和材を置換することによって毛細管空隙を変化させたコンクリートの透気係数について検討を加える。Fig. 8はコンクリートの透気係数に及ぼすフライアッシュ置換の影響を示す。水中養生28日の場合、フライアッシュ置換率20%まではフライアッシュ無混入のコンクリートの透気係数と同等もしくはそれ以下の値となっている。しかしながらフライアッシュ置換率30%以上になるとフライアッシュ無混入のコンクリート

の透気係数より大きくなっている。それに対して水中養生91日の場合、水和の進行に伴いフライアッシュ無混入のコンクリートの透気係数は水中養生28日の場合より小さくなっている。さらにフライアッシュを混入したコンクリートの透気係数も水中養生28日の場合より小さくなっているが、その割合はフライアッシュ無混入のものより大きい。その結果フライアッシュを混入したコンクリートの透気係数は置換率によらずフライアッシュ無混入のものより小さくなっている。ポゾランを適量混合することはコンクリートの透気性減少に効果があるといわれているが<sup>8)</sup>、本実験においては最適置換率は水中養生91日の場合20%であった。このようにフライアッシュを置換し水中養生を91日行ったコンクリートが無混入のコンクリートより気密になった原因はフライアッシュのもつポゾラン反応による水和生成物が毛細管空隙を埋めることによるものと思われる。Fig. 9はコンクリートの透気係数と圧縮強度の関係を示す。なおここで用いたコンクリートの圧縮強度はそれぞれ水中養生28日、91日終了後に圧縮試験を行ったものである。透気係数は圧縮強度の増加に伴って減少している。フライアッシュを置換して水中養生を28日行ったコンクリートの透気係数は同程度の圧縮強度を有するフライアッシュ無混入のコンクリートの透気係数とほぼ同じである。それに対してフライアッシュを置換して水中養生を91日行ったコンクリートは同一圧縮強度で水中養生28日のものと比較した場合どのフライアッシュ置換率においても気密性の高いコンクリートとなっている。

次にFig. 10はコンクリートの透気係数に及ぼすシリカヒュームの影響を示す。コンクリートの透気係数はシリカヒュームの置換率が大きくなるにつれておおむね小さくなっている。その程度は水中養生の日数によらず

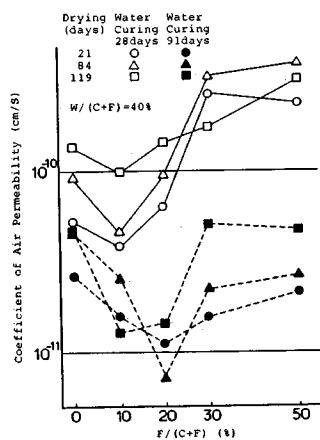


Fig. 8 Effects of Replacement of Fly Ash on Air Permeability.

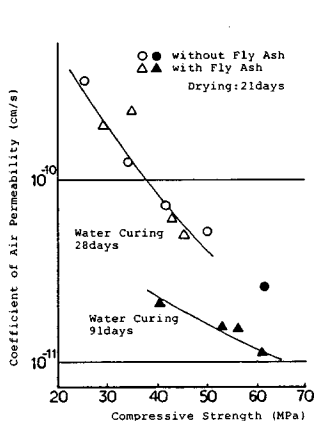


Fig. 9 Relationship between Compressive Strength and Coefficient of Air Permeability.

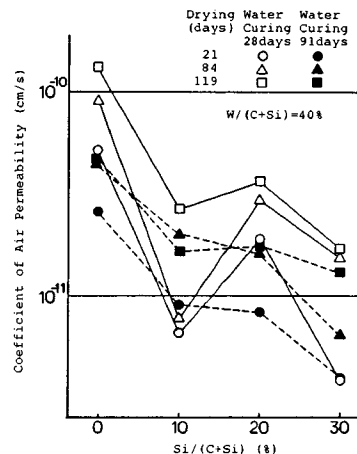


Fig. 10 Effects of Replacement of Silica Fume on Air Permeability.

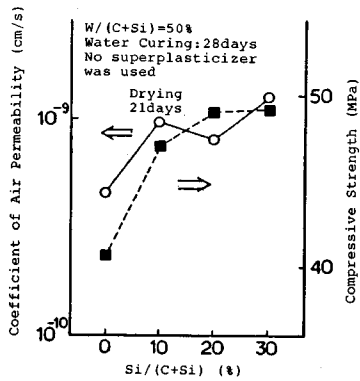


Fig. 11 Air Permeability and Compressive Strength of Concrete with Silica Fume without Superplasticizer.

は同じである。シリカヒュームはフライアッシュを含めたその他のボゾラン物質に比べて、その優れた点として高い活性度およびシリカヒュームの粒子が非常に微小であることが挙げられている<sup>15)</sup>。つまりシリカヒュームを置換したコンクリートの透気係数が水中養生日数によらず小さくなった原因は、早い時期におけるボゾラン反応による水和物と微小な粒子のためセメントの粒子と粒子の間に侵入することによるものである。Fig. 11は高性能減水剤を用いずにシリカヒュームを置換したコンクリートの透気係数と圧縮強度を示す。シリカヒュームを置換したコンクリートの圧縮強度は高性能減水剤を用いずともシリカヒューム無混入のものより大きくなっているが、シリカヒュームを置換したコンクリートの透気係数は無混入のものより大きくなっている。これはシリカヒュームの粒子が非常に微小な粒子であるため凝集しやすいので、セメント粒子間の空隙を埋めることができなかつたものと考えられ、微細粒子の進入効果によりコンクリートの気密性の改善を期待するにはシリカヒュームを十分に分散させる必要がある。

### (3) 乾燥がコンクリートの透気性に及ぼす影響

Fig. 7, 8, 10で行った透気試験において、気中養生ごく初期のコンクリートからの透気は観察されず、その後乾燥日数が増加するにつれて透気係数が大きくなった。このようにコンクリートの透気係数はコンクリートの乾燥の程度によって変化するが、その変化の程度はコンクリートから逸散した水分量によって定まる。さらに乾燥過程に形成されるコンクリート内部の水分分布もコンクリートの透気係数に影響を及ぼすことが報告されている<sup>16)</sup>。ここで水分分布が様でないコンクリートの透気係数は、逸散した水分量の違いによって透気係数が異なる部分からなるコンクリートの平均透気係数を表わすと考えられるので、本研究においてはコンクリートから逸散した水分量の違いが透気係数に及ぼす影響について検

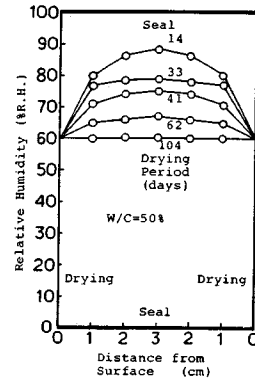


Fig. 12 Humidity Distribution in Concrete.

討を加える。

コンクリートの透気係数は乾燥により水分が逸散するにつれて大きくなることから、コンクリートを透過する空気の流れる部分はコンクリート内部の毛細管空隙であるが、すべての毛細管空隙ではなく乾燥により水分の逸散した毛細管空隙と考えられる。したがって空気が流れる毛細管空隙の量はコンクリートから逸散した水分量に等しいと仮定し、コンクリートの乾燥に伴う重量変化から求める。Fig. 12は供試体の4側面をシールして乾燥させたコンクリートの内部湿度分布を示す。コンクリート内部の湿度は、電気抵抗式湿度計の受感部(φ0.8×19 cm)をあらかじめ供試体の所定の位置に設けたφ1×7 cmの穴に挿入して測定した。Fig. 12に示すコンクリート内部の水分分布を湿度によって実測した結果およびコンクリート中の水分分布に関する既往の研究より<sup>17)</sup>、4側面をシールして相対する2面から水分を逸散させた場合にコンクリート中の水分分布は鍋底型の分布となるため、コンクリート内部の大部分はほぼ同様の水分分布とみなせる。そこで本実験では空気の透過する方向に平行な4側面をシールして乾燥させた供試体を用いた。

Fig. 13は温度20°C一定で湿度60±5% R.H.で7日間乾燥させた後、湿度85±5% R.H.、60±5% R.H.、35±5% R.H.の高、中および低湿度の条件で乾燥させたコンクリートの透気係数と乾燥日数の関係を示す。本実験において中湿度条件下での乾燥(7日間)を含めた乾燥日数10日までは、一部の例外を除いて、コンクリートからの透気は観察されなかつた(Fig. 13中の黒印は透気が観察されなかつたことを意味する)。乾燥日数10日以後においては、高湿度に置かれたコンクリートの透気係数は、ある程度乾燥が進み透気が観察されるようになった後においては、乾燥日数が経過してもほとんど変化していない。それに対して中および低湿度に置かれたコンクリートの透気係数はどの水セメント比においても

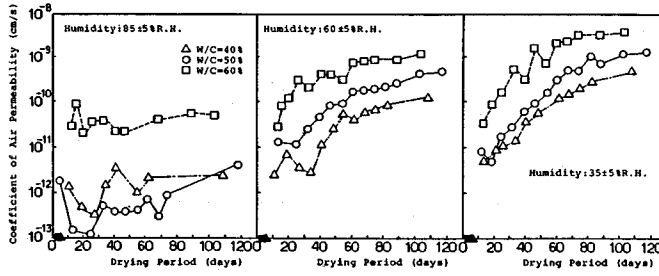


Fig. 13 Relationship between Coefficient of Air Permeability and Drying Period.

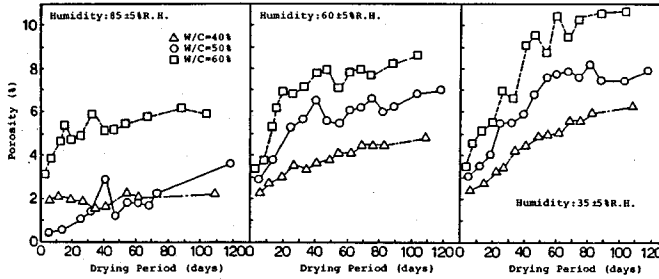


Fig. 14 Relationship between Porosity and Drying Period.

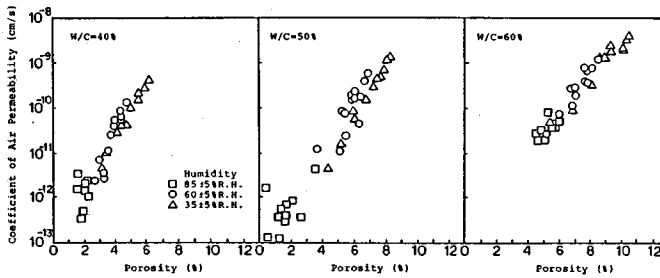


Fig. 15 Relationship between Coefficient of Air Permeability and Porosity.

乾燥日数の経過とともに増加している。しかしながらその増加割合は乾燥日数の経過につれて徐々に減少し、ほぼ一定の値に収束する傾向がある。その傾向を水セメント比別に比較すると水セメント比が高くなるにつれてコンクリートの透気係数は乾燥日数初期において急速に増加し、収束する値も大きくなっている。Fig. 7のように同一乾燥日数でコンクリートの透気係数を比較する場合同一湿度条件下に置かれたコンクリートの透気係数は水セメント比の高いものほど大きな値となっている。また同一配合のコンクリートであってもコンクリートが置かれる環境条件により異なり本実験においてはコンクリートの置かれる周囲の湿度が低くなるにつれてコンクリートの透気係数は大きな値となっている。

次にコンクリートより逸散した水分量と乾燥日数の関係を Fig. 14 に示す。ここでコンクリートから逸散した

水分量は供試体の体積に対する割合で表わしており、以下空隙率とよぶ。各湿度条件下に置かれたコンクリートの空隙率と乾燥日数の関係は Fig. 13 に示したコンクリートの透気係数と乾燥日数の関係と同様な傾向を示している。そこで空隙率と透気係数の関係を Fig. 15 に示す。どの水セメント比の場合においてもコンクリートが置かれた湿度条件にかかわらず空隙率と透気係数の間により相関関係がみられる。しかしながら、空隙率の増加による透気係数の増加割合は水セメント比によって異なっており、空隙率のみでは配合の異なるコンクリートの透気係数を評価することはできない。

(4) コンクリートの透気係数の定量的評価

セメントペーストの内部組織は10 Å程度のゲル空隙から数マイクロ程度の半径を有する毛細管空隙に至るまで種々の大きさの空隙が含まれている。さらにコンク

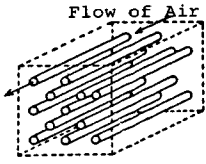


Fig. 16 Model based on linear capillaries.

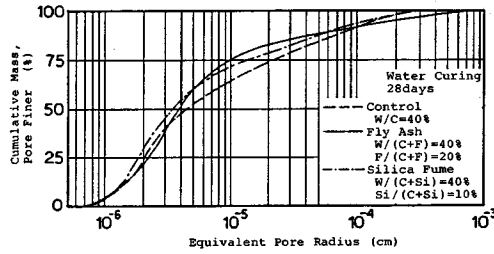


Fig. 17 Pore Size Distribution.

リート全体としては骨材下面の空隙，連行空気泡および微細なひびわれなどがありコンクリート内部の細孔構造は一樣ではない。そのため厳密にはコンクリートの透気係数は単純に空隙率の関数で表わされるものではなく，コンクリートに含まれる空隙の大きさと分布ならびにそれらの連続性を考慮する必要がある。そこで本研究では配合の異なるコンクリートの透気係数を定量的に評価するために，空隙の量と空隙の大きさを取り上げ，既往の多孔体における流体の透過の研究と同様に，コンクリートを Fig. 16 に示すようなまっすぐで均一な半径の流管を有する多孔体と仮定して検討した<sup>(11), (18), (19)</sup>。そして，細孔が小さくまたそれほど大きな流速は得られないので，ここでは細孔の中を層流で流れていると仮定した。このように考えた多孔体の見掛けの流速は圧力勾配および流管の半径の二乗と空隙率との積に比例する。したがって Darcy 則と比較すると，このモデル化した多孔体の透過率は次のようになる。

$$K' = C \epsilon d^2 \dots \dots \dots (8)$$

ここで  $K'$  は多孔体の透過率， $\epsilon$  は多孔体の空隙率， $d$  は多孔体の流管の半径， $C$  は定数である。また透過率  $K'$  は流体の粘性係数の影響を受けるがここでは定数  $C$  の中に含まれており，したがって  $\epsilon d^2$  は面積つまり長さの 2 乗の次元をもち，流体の性質には無関係で多孔体の空隙構造のみに関係するものである。

以上の考え方をコンクリートの透気性に適用すると，コンクリートを透過する空気の流れとなる空隙は水分の逸散した毛細管空隙であるので，空隙率  $\epsilon$  は Fig. 15 の結果からコンクリートから逸散した水分量で表わすことができる。したがって乾燥の程度が進むにつれてコンクリートの透気係数が大きくなることは，Fig. 14 に示されるように空隙率の増加によって表わされる。

次に流管の半径  $d$  としては，空気が流れる部分はコンクリート内部の毛細管空隙であるので，毛細管空隙の平均半径を用いた。Fig. 17 は細孔径加積曲線の一例を示す。Fig. 17 に示されるように毛細管空隙の半径は分布をもつため，本実験で用いた毛細管空隙の半径は水銀圧入法により求めた細孔径分布の細孔径加積曲線の 50

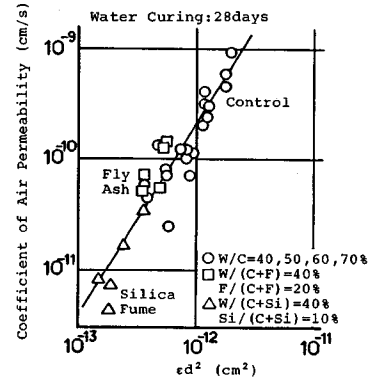


Fig. 18 Relationship between  $\epsilon d^2$  and Coefficient of Air Permeability.

% に相当する平均半径である。フライアッシュおよびシリカヒュームを混入したコンクリートの毛細管空隙の平均半径は混和材無混入のものより小さくなっている。つまり水セメント比の変化あるいは混和材置換が透気係数に及ぼす影響は空隙率の増加割合によって表わされるが，毛細管空隙の平均半径の大きさによっても評価される。

Fig. 18 は本実験で得られたコンクリートの透気係数と  $\epsilon d^2$  の関係を示す。Fig. 15 において 1 つの配合のコンクリートの透気係数に関しては，コンクリートから逸散した水分量による空隙率のみによって評価することができたが，空隙率および毛細管空隙の平均半径の両者を用いることにより，Fig. 18 から明らかなように，水セメント比の異なった場合，あるいはフライアッシュおよびシリカヒュームを置換した場合などの配合の異なるコンクリートの透気係数を  $\epsilon d^2$  の関数として 1 つの直線で表わすことができる。なお Fig. 18 の結果において，透気係数と  $\epsilon d^2$  の関係をみると  $K = (\epsilon d^2)^n$  となり式 (8) と異なっている。これは実際には毛細管空隙はまっすぐにはつながっておらず，本研究で用いたモデルと異なるためである。今後の課題として，空隙構造の幾何学的な影響を考慮したモデルを用いて，より厳密にコンクリートの透気係数を検討する必要があるが，コンクリートがまっすぐで均一な半径を有する細管の集合体であるというモデルを用いた Fig. 18 の結果は，コンクリートから逸散した水分量による空隙率と毛細管空隙の平均半径によって配合の異なるコンクリートの透気係数を定量的にとらえていると思われる。

#### 4. 結 論

本研究はコンクリートの透気性状を把握すべく実験を行いコンクリートの透気性の指標である透気係数について考察し，コンクリートの透気性のメカニズムについて



検討を加えた。本研究で得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) コンクリートに圧力差によって空気を透過させた場合、透気量は載荷圧力の増加割合以上に多くなる。さらにコンクリート中の圧力分布は直線分布とはならず式(6)で表わされる放物線分布となる。

(2) コンクリート中の空気の流れは本実験の範囲においては Darcy 則に従うとみなせ、コンクリートを透過する空気が同一条件で流れているならば、コンクリートの透気係数は供試体厚さによらず一定であり、コンクリートの内部構造によって決定されるものである。したがって式(7)によって得られる透気係数をコンクリートの透気性の指標として用いることができる。

(3) 水中養生 28 日ではフライアッシュを置換することによりコンクリートの気密性は改善されないが、水中養生 91 日行うことによりフライアッシュを置換したコンクリートの透気係数はフライアッシュのポゾラン反応によりフライアッシュ無混入のものより小さくなる。

(4) シリカヒュームは高い活性度のポゾラン反応とその微小な粒子によってコンクリートをよりち密にするため、シリカヒュームを置換したコンクリートは水中養生日数によらずより気密性の高いコンクリートとなり、その程度はシリカヒュームの置換率が増加するにつれて大きくなる。

(5) 空気の通路はすべての毛細管空隙ではなく乾燥により水分が逸散した空隙であるので、乾燥条件下に置かれたコンクリートの透気係数は水分が逸散しやすいコンクリートあるいは水分が逸散しやすい状態に置かれたコンクリートほど時間とともに急速に増加し大きな値となる。

(6) コンクリートの透気係数は水銀圧入法によって求めたコンクリート中の毛細管空隙の平均細孔半径とコンクリートから乾燥により逸散した水分量を用いることによりこれら 2 つの関数として 1 つの直線で表わされる。

謝 辞：本研究を行うにあたり、当時東京工業大学卒論生であった柳瀬 進氏(住友建設(株))、荒木 淳氏(東洋エンジニアリング(株))および小西伸彦氏((株)大林組)の協力を得ました。また本研究は文部省科学研究費によって行われた研究成果および吉田研究奨励金によって行われた研究成果をまとめたものである。ここに謹んで謝意を表し、厚くお礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) Grube, H. and Lawrence, C. D. : Permeability of concrete to oxygen, RILEM Seminar, Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor Exposure, pp. 68~79, 1984.
- 2) Figg, J. W. : Methods of measuring the air and water permeability of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 25, No. 85, pp. 213~219, 1973.
- 3) 一木保夫・池田克己：コンクリートの透気性に関する試験(第一報), 土木試験所報告, 52 回, pp. 43~54, 1940.
- 4) 神山行男・岡田克也・中島 徹：コンクリートおよびコンクリート部材の気密性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次講演会論文集, 第 1 回, pp. 57~60, 1979.
- 5) 谷口尚武・渡辺清治：コンクリートの透気性に関する一実験, 日本建築学会論文報告集, 第 63 号, pp. 121~124, 1959.
- 6) 青柳征夫・西林新蔵・岩崎訓明：新体系土木工学, 29, 技報堂出版, pp. 243~245, 1981.
- 7) Langley, A. A. : The air and water-vapour permeance of glass-fiber-reinforced cement, Magazine of Concrete Research, Vol. 33, No. 114, pp. 18~26, 1981.
- 8) 吉井豊藤丸・森 仁明・神田 衛：コンクリートの透気性に関する研究, セメント技術年報, 12, pp. 339~343, 1958.
- 9) 秋山 暉ほか：コンクリート箱型缶体の透気性に関する研究, セメント技術年報, 26, pp. 293~297, 1972.
- 10) 日野幹雄：明解水理学, 丸善, pp. 283~295, 1983.
- 11) 最上武雄編：土質力学, 技報堂出版, pp. 89~124, pp. 933~940, 1969.
- 12) 長瀧重義・氏家 勲：コンクリートの透気性, セメント・コンクリート, No. 455, pp. 24~31, 1985.
- 13) 笠井芳夫・松井 勇：モルタルの透気性に関する試験, セメント・コンクリート, No. 436, pp. 8~15, 1983.
- 14) Powers, T. C. et al. : Permeability of portland cement paste, Jour. Amer. Concr. Inst., 51, pp. 285~298, 1954.
- 15) Malhotra, V. M. et al. : Silica fume concrete-properties, applications and limitations, Concrete International, Vol. 5, No. 5, pp. 40~46, 1983.
- 16) 長瀧重義・氏家 勲・荒木 淳：コンクリートの透気性に影響を及ぼす諸要因, セメント技術年報, 39, pp. 209~212, 1984.
- 17) 椎名国雄：コンクリートの内部湿度と変形, コンクリートジャーナル, Vol. 7, No. 6, pp. 1~11, 1969.
- 18) Nyame, B. K. and Illston, J. M. : Relationships between permeability and pore structure of hardened cement paste, Magazine of Concrete Research, Vol. 33, No. 116, pp. 139~146, 1981.
- 19) Schedeger, A. E. : The Physics of Flow through Porous Media, Toronto University Press, third edition, pp. 99~151, 1974.

(1987. 9. 17・受付)