

論文 乾燥によるコンクリートの透気係数の変化に関する研究

河野 俊一*1・氏家 勲*2

要旨: コンクリートの透気係数は内部の全ての空隙ではなく、ある一定以上の大きさの空隙が関係し、さらにコンクリートの含水状態によっても透気係数に関与する空隙は変化する。本研究はコンクリートの透気係数の最大値を与えて、空隙の連続性をコンクリートの含水状態の関数で表し、コンクリートの乾燥の程度により変化する透気係数を評価することを試み、コンクリートおよびモルタルを用いた透気試験結果と比較検討したものである。

キーワード: 透気係数, 空隙構造, 空隙率, 屈曲度, コンクリート, モルタル

1. はじめに

コンクリート構造物の設計システムの枠組みが仕様規定から性能規定への移行が検討されている¹⁾。構造物に要求される性能に使用性があり、使用性の性能項目の一つとして気密性が挙げられている²⁾。構造物の気密性の性能照査を行うための照査指標としてコンクリートの透気係数があるが、コンクリートの透気係数は材料特性に加えて環境条件、特に乾燥の影響を考慮して評価する必要がある。

コンクリートの透気係数は物質移動係数の一つであり、透水係数や拡散係数と同様にコンクリート内部の空隙構造に関係するが、影響を及ぼす空隙は全ての空隙ではなく、ある一定以上の大きさの空隙であり³⁾、さらに乾燥によって水分が逸散した空隙である⁴⁾。従って、コンクリートの透気係数は水分が逸散した空隙の量が増加すると大きくなるが、それら空隙の量に比例するのではなく、べき関数的に増加する。これは水分が逸散することにより、空気の通路である空隙の連続性が変化するためである。

本研究では空隙の連続性を水分の逸散した空隙の量による空隙率の関数で表し、透気係数の最大値を与えて、乾燥の程度によって異なるコンクリートの透気係数を評価することを試みている。そして、コンクリートおよび空隙構造に

大きく影響を及ぼす水セメント比を広範囲で変化させるためにモルタルを用いて透気試験を実施し、その結果を用いて透気係数の評価方法について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

実験に用いたモルタルおよびコンクリートには市販の普通ポルトランドセメントを使用した。モルタルには細骨材に海砂(大三島産, 比重: 2.54, 吸水率: 2.72%, 粗粒率: 3.22)を用い、微粒分を補うためにフライアッシュ(比重: 2.30)を細骨材の質量に対して5%使用した。これらの材料でフロー値170~200のモルタルが得られたので混和剤は用いていない。モルタルの配合を表-1に示す。コンクリートには細骨材に川砂(鬼怒川産, 比重: 2.61, 吸水率: 2.60%, 粗粒率: 2.85)を、粗骨材に砕石(鬼怒川産, 最大寸法: 20mm, 比重: 2.65, 吸水率: 1.76%, 粗粒率: 6.73)をそれぞれ用いた。混和剤はり

表-1 モルタルの配合

配合	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			
		水	セメント	細骨材	フライアッシュ
M50	50	250	500	1317	66
M70	70	250	357	1428	71
M100	100	250	250	1511	76
M130	130	250	192	1555	78
M160	160	250	156	1583	80

*1 三井建設(株) 福岡支店 (正会員)

*2 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 工博 (正会員)

表一 2 コンクリート配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
			水	セメント	細骨材	粗骨材	減水剤	AE助剤
C40-165	40	44	165	413	760	985	1.031	0.0268
C50-165	50	46	165	330	826	988	0.825	0.0182
C60-165	60	50	165	275	920	938	0.688	0.0193
C50-155	50	46	155	310	845	1011	0.775	0.0223
C50-175	50	46	175	350	806	964	0.875	0.0245

グニンスルホン酸系 AE 減水剤とアルキアリルスルホン化合物系の AE 助剤をスランブ 10±2cm, 空気量4±1%となるように使用量を決定した。コンクリートの配合を表一 2 に示す。

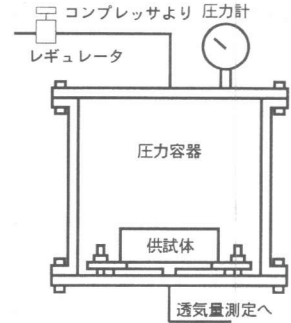
2.2 供試体

透気試験にはコンクリートおよびモルタルどちらも 15×15×5cm の角柱供試体を用いた。供試体打設の際は 1cm 程度余盛りし、ブリーディング水が流れ出ないよう配慮しブリーディング終了後に表面仕上げを行った。供試体は打設後 1 日で脱型を行い、材齢 28 日まで水中養生を行った。水中養生終了後に供試体は透気面 (15×15cm) 以外の 4 側面を粘着テープでシールして透気面の 2 方向から所定の空隙率 (供試体から逸散した水分量/供試体体積) になるまで実験室内で乾燥し、高い空隙率を目標とする供試体はシリカゲルの入った容器に移し乾燥を促進させた。所定の空隙率に達した供試体は透気試験を行うまで塩化ビニールフィルムで包み実験室内に静置した。また、一部の供試体は空隙率の最大値を求めるために、モルタルでは 50℃ に保った乾燥炉で、コンクリートでは加熱によりモルタルと粗骨材の線膨張係数の差による微細ひび割れの発生を考慮し、真空ポンプにより脱気し、供試体質量が一定になるまで乾燥させた。これにより得られた空隙率を本研究では全空隙率と呼ぶ。

2.3 試験方法

(1) 透気試験

透気試験は供試体の透気面以外の 4 側面をエポキシ樹脂系接着剤で気密処理を行い、図一 1 に示す装置を用いて実施した。圧力容器内には 0.2N/mm² の空気圧を与え、透気量は空気圧を与えて 2 時間後に測定した。透気係数は得られた



図一 1 透気試験装置

透気量から次式を用いて算出した。

$$K = \frac{2LP_2}{P_1^2 - P_2^2} \frac{Q}{A} \quad (1)$$

ここで、 K : 透気係数 [cm⁴/(Ns)], L : 供試体厚さ (cm), P_1, P_2 : 載荷圧力, 流出側圧力 (N/cm²), Q : 透気量 (cm³/s), A : 透気面積 (cm²) であり、流出側圧力は大気圧とし、0.1N/mm² を用いた。

(2) 空隙容積分布の測定試験

本研究ではコンクリートおよびモルタルの空隙構造の物理的性質を水銀圧入法により測定した。試料は透気試験終了後に 105℃ 炉乾燥を施した供試体を粗粉碎したものを用いた。

3. 透気係数と空隙構造の関係

本研究では透気係数と内部の空隙構造を関係づけるために、空隙構造のモデルに一つの管路において直径の異なるいくつかの管路で構成される毛管モデルを用いた⁵⁾。管路 1 本の平均流速を Poiseuille の法則で表し、モデル全体に対して求めた流量と、モデルに対して Darcy 則を適用して求めた流量を比較することにより、透気係数と空隙構造の関係は次式で表される。

$$K_x = \frac{c}{\mu} \frac{d_{av}^2}{\tau_x^2} \varepsilon_x \quad (2)$$

ここで、 K_x は空隙率 ε_x の時の透気係数である。 c は管路の形状に関する係数、 μ は粘性係数である。 d_{av} は平均空隙径であり、一つの管路を構成する各管路の長さと同径と仮定すると次式で与えられる⁶⁾。

$$1/d_{av}^2 = \sum (f_i/d_i^2) \quad (3)$$

ここで、 d_i は任意の管径であり、 f_i は管路全体の空隙量に対する管径 d_i の空隙量の割合である。

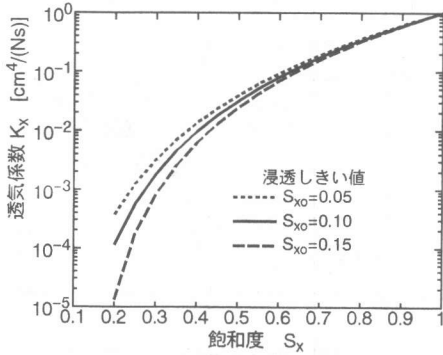


図-2 浸透しきい値の影響

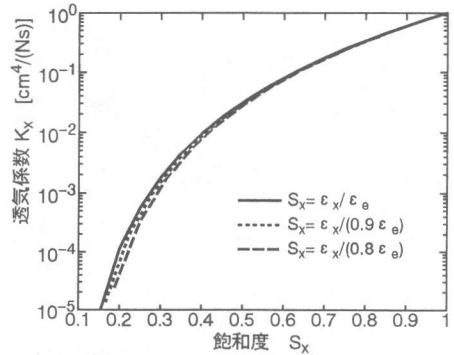


図-3 全空隙率の影響

τ_x は屈曲度であり、モデルの見かけの長さ L に対する空気が流れる管路の長さ L_x の割合($\tau_x = L_x/L$)であり、1以上の値となる。屈曲度が一定であるならば、式(2)より透気係数は空隙率に比例するが、実測されたコンクリートの透気係数は空隙率のべき関数となっている。これは水分が逸散することによりこれまで流れていなかった空隙が新たな通路となるためであり、空隙率の増加とともに屈曲度の低下によるためと説明できる。そこで本研究ではある領域内の要素のつながりを対象とする考え方である浸透理論⁷⁾と気液二相浸透の既往の研究⁸⁾を参考に、屈曲度に関して次式の関係が成り立つとする。

$$\frac{\tau_e}{\tau_x} = \left(\frac{S_x - S_{x0}}{1 - S_{x0}} \right)^n \quad (4)$$

ここで、 S_x は全ての空隙から水分が逸散した場合の全空隙率 ϵ_e に対する任意の空隙率 ϵ_x の割合($S_x = \epsilon_x/\epsilon_e$)であり、空気に関する飽和度である。 S_{x0} は浸透理論において浸透しきい値と呼ばれるもので、ある領域に要素がこの値以上の割合であれば領域の中に端から端まで連続した要素が存在するというものである。そして、要素の連続性の程度は飽和度と浸透しきい値の差の n 乗に比例する。 τ_x は $S_x=1$ の場合、即ち全ての空隙から水分が逸散した状態での屈曲度であり、式(2)より以下のように表される。

$$\tau_e^2 = \frac{c}{\mu} \frac{d_{av}^2}{K_e} \epsilon_e \quad (5)$$

ここで、 K_e は全空隙率での透気係数である。式(2)に式(4)、式(5)を代入すると次式が得られる。

$$K_x = S_x \left(\frac{S_x - S_{x0}}{1 - S_{x0}} \right)^{2n} K_e \quad (6)$$

図-2は式(6)において浸透しきい値を変化させた結果を示す。なお、図-2では $K_e=1$ とし、 n は後述する実験結果を参考に $n=1.7$ としている。図から浸透しきい値が大きくなると透気係数は同じ飽和度であっても大きくなっており、その割合は飽和度0.25で数倍程度である。浸透しきい値の違いが式(6)から得られる透気係数に及ぼす影響は n の値が大きくなると大きくなるが、飽和度の小さい範囲以外ではその影響が小さいことと、既往の研究で浸透しきい値に関して要素のつながりを面心立方格子とした場合に $S_{x0}=0.119$ を得ていることから⁷⁾、本研究では $S_{x0}=0.1$ とする。また、本研究では全空隙率 ϵ_e とその場合の透気係数 K_e にコンクリートでは真空ポンプで、モルタルの場合には50℃の乾燥炉で乾燥した値を用いている。乾燥が不十分で絶乾に至っていないことも考えられるので、図-3は飽和度が0.9と0.8の場合の空隙率を全空隙率とした時の透気係数と飽和度の関係を示す。図-3では $S_{x0}=0.1$ 、 $n=1.7$ を用いている。基準とした全空隙率が小さくなるにつれて、透気係数は小さくなるがその差はわずかである。従って、式(6)において乾燥が不十分な供試体の結果を用いてもその影響は小さいと考えられる。

4. 実験結果および考察

4.1 モルタルの透気係数

図-4は空隙率と透気係数の関係を示したも

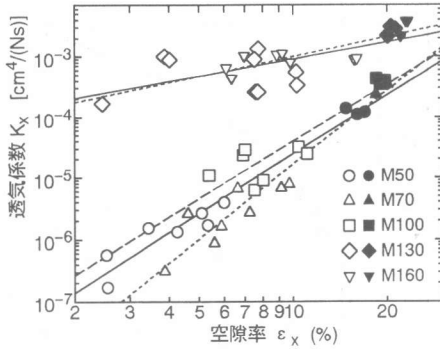


図-4 モルタルの空隙率と透気係数の関係

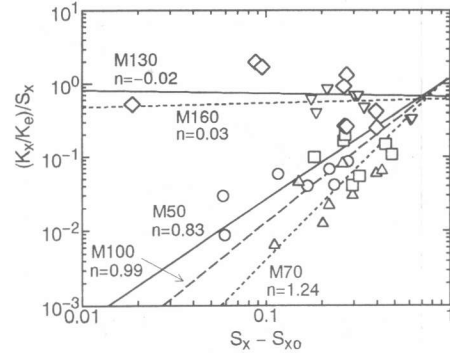


図-5 屈曲度に関する指数n (モルタル)

のである。図中の黒塗りは50℃で炉乾燥したものであり、直線は回帰したものである。空隙率と透気係数の関係は水セメント比160%、130%と水セメント比100%、70%、50%に分かれている。水セメント比160%と130%で

は空隙率と透気係数の関係に殆ど差がみられない。一方、水セメント比100%、70%、50%では差はみられるが、必ずしも水セメント比の順にはなっておらず、同一空隙率で比較すると水セメント比70%が最も小さな透気係数となっている。

そこで、この透気性状の違いを検討するために水銀圧入法で計測した空隙構造の物理的性質を表-3に示す。表中の値は2回計測を行った結果の平均値である。また、表の空隙量と平均空隙径は既往の研究を参考に^{3),9)}、100nm以上の空隙が透気に関係するとして100nm以上の空隙に関して求めたものである。平均空隙径(円筒)は空隙を円筒と仮定し空隙体積と空隙比表面積から求めたものであり、平均空隙径(式(3))は式(3)を用いたものである。しきい空隙径は空隙量の累積曲線において空隙量が増加し始める空隙径であり、連続する空隙の最小径と報告されている¹⁰⁾。全空隙量および100nm以上の空隙量は水セメント比とともに大きくなっている。しかしながら、平均空隙径およびしきい空隙径に関しては水セメント比160%と130%ではほとんど差がなく、水セメント比70%が最も小さく、透気係数の

表-3 空隙構造の物理的性質(モルタル)

配合	全空隙量 (cc/g)	空隙量* (cc/g)	平均空隙径* (円筒)(nm)	平均空隙径* (式(3))(nm)	しきい空隙径 (nm)
M50	0.068	0.042	195	174	2194
M70	0.076	0.044	147	147	853
M100	0.084	0.051	226	185	1936
M130	0.091	0.053	264	197	4785
M160	0.105	0.061	277	211	4635

*: 空隙径が100nm以上の空隙に関する値

傾向と対応した結果となっている。

また、透気係数に屈曲度が関係するので、式(6)の関係を用いてnを求めたのが図-5である。図中の回帰直線の傾きの1/2がnである。なお、図-5では全空隙率 ϵ_0 とその時の透気係数 K_0 には50℃炉乾燥の供試体3体の平均値を用い、浸透しきい値 S_{x0} は0.1を用いている。図から水セメント比160%と130%の場合にはnがほとんど0に近く、空隙率が変化しても屈曲度は変化しないことを表しており、言い換えれば透気係数が空隙率の1次関数となることを意味している。水セメント比70%ではnが最も大きく、式(4)よりnが大きくなると同じ飽和度での屈曲度が大きくなる。このことと空隙径が小さいことにより図-4において透気係数が小さくなったことが説明できる。水セメント100%と50%の場合にはnにあまり差はなく、透気係数の違いは主に空隙径の影響によるものと考えられる。

4.2 コンクリートの透気係数

図-6は水セメント比および単位水量を変化させたコンクリートの空隙率と透気係数の関係を示す。図中の黒塗りの印は真空ポンプで乾燥

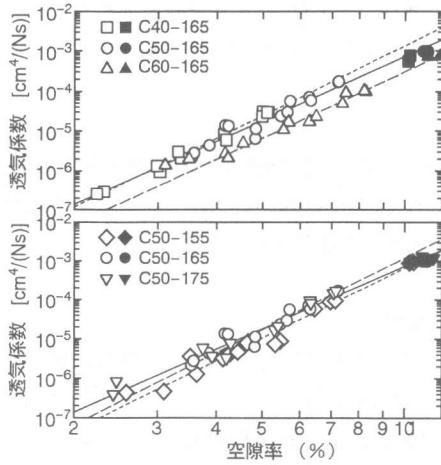


図-6 コンクリートの空隙率と透気係数の関係

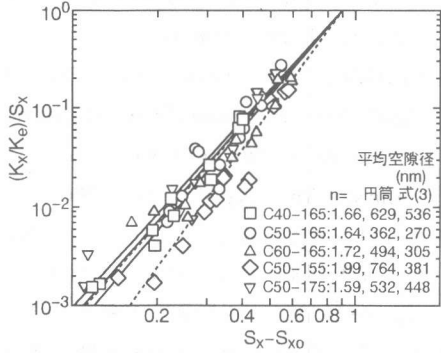


図-7 屈曲度に関する指数 n (コンクリート)

させた供試体の結果である。水セメント比を変化させた場合、水セメント比40%と50%の差は僅かではあるが、水セメント比60%の回帰直線はそれらより下に位置している。単位水量を変化させた場合ではあまり差はみられないが、単位水量155kg/m³の回帰直線が他に比べて下にある。

図-7 はモルタルの場合の図-5 と同様な方法でコンクリートに関して n を求めた結果を示す。ここでは真空ポンプで乾燥した2体の供試体の結果の平均値を基準としている。また、図中の平均空隙径は表-3 と同様に水銀圧入法の測定結果から100nm以上の空隙に関して計算した結果である。ただし、測定は各配合で1回である。コンクリートの n の値はモルタルに比べて大きくなっているが、これはコンクリートでは粗骨材を空気が迂回するため、空気の通路が長くなる

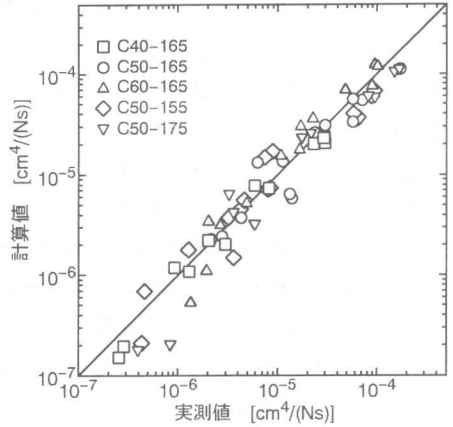


図-8 計算値と実測値の比較(本研究のデータ)

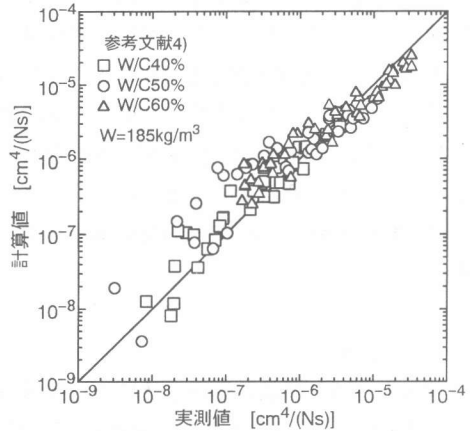


図-9 計算値と実測値の比較(既往の実験データ)

ためと考えられる。また、単位水量が小さくなるにつれて n が大きくなっているが、モルタルの場合と同様に水セメント比の違いによる n の変化には一定の傾向はみられない。図-6 に示す透気性状はここで得られた n と空隙径により一部を除いて概ね対応した関係となっている。

また、コンクリートの場合にはモルタルの場合に比べて、水セメント比の範囲の違いによることも考えられるが、 n の変化の程度が小さくなっている。そこで、 n を配合によらず一定であると仮定して、式(6)を用いて透気係数を予測した結果を図-8 に示す。 n には図-7 で得られた結果の平均値である1.7を用い、浸透しきい値には0.1を用いている。 n を得たものと同じデータに関して予測を行っているために計算値は実測値とよく一致している。次に、図-9 は図-8 と

同じように、 $n=1.7$ 、 $S_{w0}=0.1$ として既往の研究で得られた実験結果に対して式(6)により透気係数を予測した結果を示す。図-9の実測値は参考文献4)で得られたものである。ただし、既往の研究においては乾燥炉あるいは真空ポンプで乾燥させたコンクリートの結果はないので、実験で得られた中で最大の空隙率を全空隙率 ϵ_0 とし、その時の透気係数を K_0 として用いた。図-8に比べてばらついてはいるが、ある程度の精度をもって計算値は実測値を予測しているといえる。以上のように式(6)を用いることにより空隙率が異なる、即ち乾燥によって変化する透気係数を評価することができると考えられる。今後は混和材を含んだコンクリートなど使用材料が異なる時に n がどの程度変化するか、その場合に n をどのようにして与えるかなど検討する必要がある。なお、本研究では ϵ_0 と K_0 には実測値を用いることにより、評価しようとするコンクリートの材料特性や配合の影響を式(6)に取り込めると考えている。

4. まとめ

本研究は透気係数に影響を及ぼす空隙構造についてモルタルとコンクリートを用いて検討し、乾燥により変化する透気係数の評価を行ったものである。本研究の範囲で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 水セメント比160%と130%のモルタルの場合、透気に関係する空隙構造の物理的性質が似ているため、空隙率と透気係数の関係はほぼ同じとなり、また、屈曲度が空隙率に依存しないため透気係数は空隙率に比例して増加した。
- 2) 水セメント比70%のモルタルは100nm以上の空隙を対象とした場合の平均空隙径が小さく屈曲度が大きいことなどから他の配合に比べて同一空隙率で比較すると透気係数が最も小さかった。
- 3) 本研究の配合でのコンクリートの屈曲度に関係する指数 n は1.6~2.0であり、配合の違いによる指数 n の変化の範囲は小さかった。
- 4) 最大の透気係数を与え、その透気係数を飽和度の関数で変化させることによる乾燥の程度に

より異なるコンクリートの透気係数の評価方法を提案し、ある程度の精度をもって評価できることを示した。

謝辞：本研究は文部省科学研究費補助金(基盤研究(C), No. 09650510)の一部として実施されたものであることを付記いたします。

参考文献

- 1) コンクリート工学協会：特集*仕様規定から性能規定へ、コンクリート工学，Vol.35，No.11，pp.3-55，1997.11
- 2) 下村匠ほか：性能照査型設計システムにおけるコンクリート構造物の使用性照査，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，第CS部門，pp.246-247，1998.10
- 3) P.K.Mehta and D.Manmohan: Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes, 7th Int. Congress on Cement Chemistry, Vol. III, pp.VII-1-VII-5, 1980
- 4) 氏家勲，長瀧重義：コンクリートの透気性の定量的評価に関する研究，土木学会論文集，No.396/V-9，pp.79-87，1988.8
- 5) A. E. Scheidegger: The Physics of Flow through porous media, Toronto University Press, pp.125-151, 1974
- 6) 河野俊一，氏家勲：セメント硬化体の細孔径の透気係数による評価に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.745-750，1998.6
- 7) 小田垣孝：パーコレーションの科学，裳華房，1993
- 8) N.T.Burdine: Relative Permeability Calculations from Pore Size Distribution Data, Petroleum Transactions, AIME, Vol.198, pp.71-78, 1953
- 9) 羽原俊祐：コンクリートの構造とその物性，セメント・コンクリート，No.549，pp.31-43，1992.11
- 10) 後藤孝治：セメント水和反応の強度発現のモデルに関する研究，東京大学学位論文，1996.8