

# 論文 コンクリート面部材における透気係数の分布性状に関する検討

山川 莉希\*1・氏家 勲\*2・河合 慶有\*3・山田 純平\*4

**要旨：**本研究はコンクリート強度および養生方法が異なるコンクリート面部材に対してダブルチャンバー法による透気試験を実施し、コンクリート面部材内での透気係数の分布状況について統計的に検討した。透気係数は施工方法などの影響を受けやすく、測定範囲を分割する必要もあるが、面部材で測定された透気係数は対数正規分布することが分かった。また、対数正規分布するとして求めたコンクリートの透気係数の変動係数は小さい場合でも 46%であり、そして、標準偏差に応じて所定の範囲内に入る透気係数を求めるための測定点数を提案した。

**キーワード：**コンクリート面部材, 透気係数, 対数正規分布, 標準偏差, 含水率

## 1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性にはかぶりコンクリートの品質が大きく影響するが、かぶりコンクリートの品質は使用するコンクリートの品質に加えて、施工や養生、環境条件により変動することから、実構造物の原位置でかぶりコンクリートの品質を評価する必要がある。かぶりコンクリートの品質において、各種の劣化現象と関係するものは物質移動抵抗性であり、物質移動抵抗性を適切に評価することにより、構造物の竣工時の耐久性能の確認や定期点検などでの健全性評価に有用な情報が得られる。かぶりコンクリートの物質移動抵抗性を評価する手法として透気試験、吸水試験及び散水試験などが挙げられる<sup>1)~3)</sup>。その中で透気試験は空気の通りやすさである透気性を評価する方法であり、非破壊で検査を行うことができ、いくつかの表層透気試験方法が提案されている<sup>1)</sup>。その中でダブルチャンバー法ではダルシー則に基づく透気係数によってコンクリートの物質移動抵抗性を定量的に評価することができる試験方法であり<sup>4)</sup>、広く利用されている。

一方で、実大試験壁に表層透気試験を適用してその測定結果からコンクリートの特性を評価した際に、多くのケースでコンクリートの特性を判別できず、この原因として施工方法や含水率の分布などに起因する構造体特有のバラつきであると報告されている<sup>1)</sup>。従って、コンクリート部材内の透気係数のバラつきを把握することは、精度良く耐久性能評価に透気係数を適用するためには必要であると考えられる。しかしながら、コンクリート部材内で透気係数がどのように分布して、その分散がどの程度であるかは明確にされていない。そこで本研究ではコンクリート強度および養生方法が異なるコンクリート面部材に対してダブルチャンバー法による透気試験を実

施し、コンクリート面部材内での透気係数の分布状況について統計的に検討し、さらにコンクリートの透気係数の変動係数や測定数についても検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

本研究では、**図-1**に示す面部材(900×200×1050mm)を呼び強度 18, 27 のコンクリートを用いて、各 3 体ずつ作製した。**図-1**の上下方向の下向きに打設した供試体を壁供試体として 2 体作製し、900×1050mm の面を上下にして打設した供試体を版供試体とし、1 体作製した。**表-1**に配合を示す。セメントは普通ポルドランドセメント(密度 3.16g/cm<sup>3</sup>)を用い、混和材にフライアッシュ(密度 2.22g/cm<sup>3</sup>)を使用した。細骨材には、砂岩砕砂 S<sub>1</sub>(愛媛県東温市, 表乾密度: 2.68g/cm<sup>3</sup>, 粗粒率: 2.97%)および石灰砕砂 S<sub>2</sub>(福岡県北九州市, 表乾密度: 2.60g/cm<sup>3</sup>, 粗粒率: 2.44)を、粗骨材は碎石(愛媛県東温市, 表乾密度: 2.61g/cm<sup>3</sup>, 粗粒率: 6.65)をそれぞれ使用した。コンクリート打設ではハンドスコップなどを使用して敷き均し、打設高さ約 20cm ごとに内部と型枠パイプレータで気泡の抜け方を観察しながら締固めをした。壁供試体

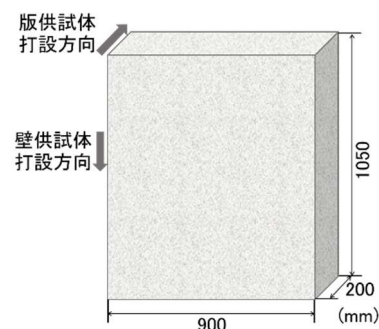


図-1 供試体の寸法

\*1 愛媛大学大学院 理工学研究科 (学生会員)

\*2 愛媛大学大学院 理工学研究科教授 博士(工) (正会員)

\*3 愛媛大学大学院 理工学研究科准教授 Ph.D. (正会員)

\*4 名工建設株式会社 土木部

表-1 コンクリートの配合

呼び強度	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )							スランプ (cm)	空気量 (%)
			水 W	セメント C	混和材 FA	細骨材		粗骨材 G	混和剤 WAR		
						S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>				
18	71	52.2	167	235	30	579	374	898	3.08	11.5	4.0
27	55	48.5	167	304	20	525	341	932	3.95	12.0	5.5

1 体と版供試体は、2 日で脱型、雨が降りかからないように 28 日間シートで覆い気中養生した(以下、18Wall-A、18Slab-A、27Wall-A、27Slab-A と呼ぶ)。壁供試体の他の 1 体は 5 日で脱型し、28 日間湿布養生を行った(以下、18Wall-W、27Wall-W と呼ぶ)。それぞれの養生が終了した後は実験室北側傍の雨掛かりのある屋外に、測定面を東西に向け、約 80cm 間隔で 2 列に並べて暴露した。

## 2.2 透気試験

本研究ではダブルチャンバー法による透気試験を採用した。透気試験はコンクリートの含水率が約 5% になった材齢約 12 週以降から実施した。また、透気試験の測定個所が多いため、9 月中旬から翌年 1 月上旬の期間の中の約 80 日間で 30 回に分けて、同日に高周波容量式の含水率計で含水率測定を行った後に透気試験を実施した。

ダブルチャンバー法の透気試験では外径 φ100mm のチャンバー(内部に φ50mm のチャンバー)をコンクリート表面に押し当てて測定することから、横方向は供試体の端部から 50mm 空け、100mm 間隔で 8 点測定し、縦方向は供試体上端部から 100mm 空け、50mm 間隔で 17 点測定し、供試体片面で 136 点の測定を行った。なお、壁供試体は両面で実施したが、版供試体では上面の表面仕上げ面では透気試験が実施できなかったため、底面のみを測定面とした。透気係数は次式より算出した。

$$k_T = \left(\frac{V_c}{A}\right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon P_a} \left(\frac{\ln \frac{P_a + \Delta P_{ieff}(t_f)}{P_a - \Delta P_{ieff}(t_f)}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_0}}\right)^2 \quad (1)$$

ここで、 $k_T$ : 透気係数(m<sup>2</sup>)、 $V_c$ : 内部セルの容積(m<sup>3</sup>)、 $A$ : 内部セルの断面積(m<sup>2</sup>)、 $\mu$ : 空気の粘性係数(=2.0×10<sup>-5</sup>N·s/m<sup>2</sup>)、 $\varepsilon$ : コンクリートの空隙量(=0.15)、 $P_a$ : 大気圧(N/m<sup>2</sup>)、 $\Delta P_{ieff}$ : 試験終了時内部セルの有効圧力上昇(N/m<sup>2</sup>)、 $t_f$ : 試験終了時時間(s)、 $t_0$ : 試験開始時間(s)(=60s)である。

## 2.3 正規分布の確認

測定された透気係数が正規分布しているかどうかを確認するために、視覚的方法として、正規確率グラフ(正規 Q-Q プロット)を用いた。正規確率グラフでは y 軸に測定値を、x 軸に正規分布に従う場合の期待値を取り、プロットが一直線上に並べば、測定値は正規分布に従っていると考えられる。期待値は観測値を昇順に並べた順位から累積確率を求め、正規分布の確率密度関数の逆関数を用いて求めた。また、統計的方法ではシャピロ・ウィルク検定を用いた<sup>5)</sup>。シャピロ・ウィルク検定は得られたデータが正規分布に従うものか否かを調べる検定法であり、データが正規分布に従うという帰無仮説を検定するものである。本研究では有意水準を 5% として、p 値が 0.05 より大きい場合に正規分布に従うと言える。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 透気係数の分布状況

図-2、3 はコンクリート面部材供試体で測定された透気係数の分布状況を示す。壁供試体は 2 面の測定を実施したが、1 面を代表として示している。図-2 の 18Wall-W の下部右側において透気係数が極端に高い部分があり、反対の面でも対応する位置で同様な結果となっている。

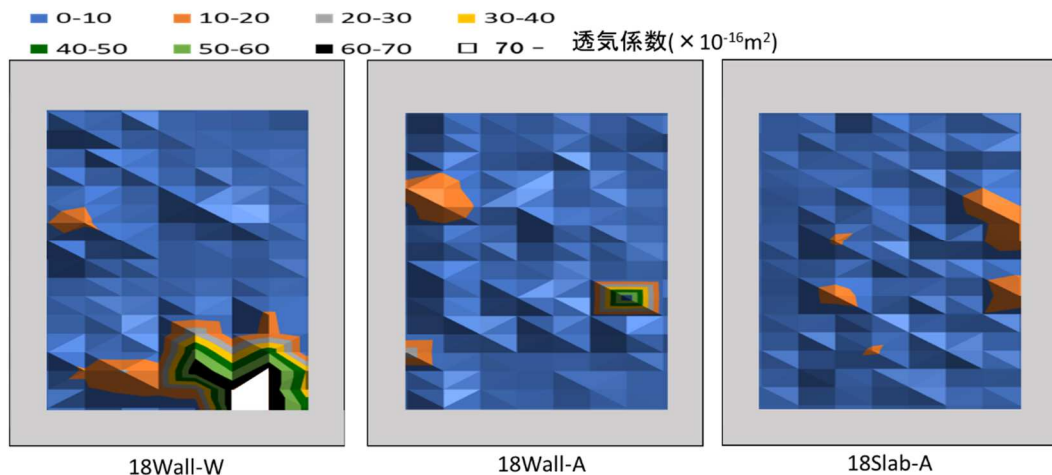


図-2 コンクリート面部材での透気係数の分布 (呼び強度 18)

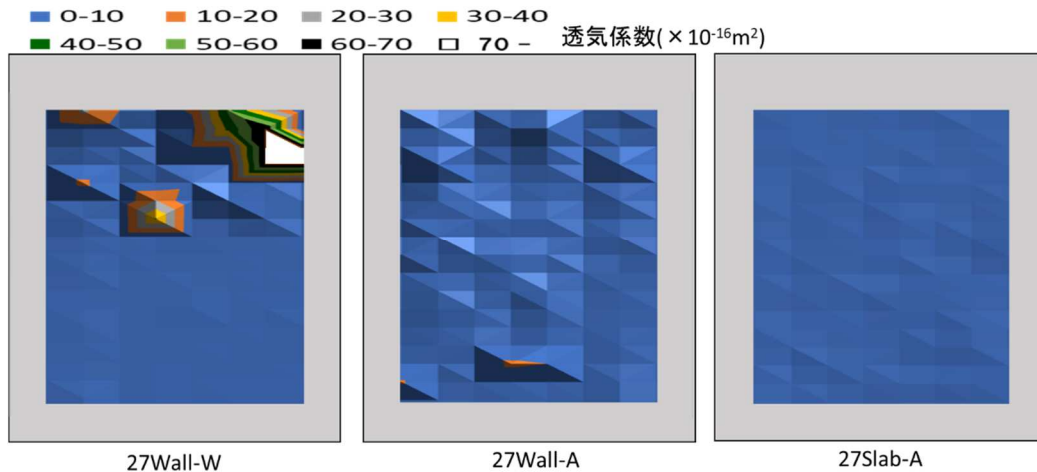


図-3 コンクリート面部材での透気係数の分布（呼び強度 27）

これは型枠の継目からの漏水による砂すじのようなものが表面で形成しており、そのためと考えられる。また、18Wall-A の右側中央付近に透気係数の高い部分があるが、供試体の表面観察からでは、その原因は確認できなかった。18Slab-A では局部的に透気係数が高いところは見られないが、全体的に図の右側が左側より高くなっている。一方、27Wall-W の上部右側に透気係数の高い部分があるが、これも表面観察からはその増加原因を推定することはできなかった。27Wall-A と 27Slab-A はほぼ様な分布となっており、27Wall-A の透気係数のほうが27Slab-A のものより高くなっている。

以下での透気係数が正規分布しているかどうかの検討において、原因が明らかで透気係数が高い値と測定値が  $70 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以上のものは除外した。ダブルチャンバー法では透気係数の測定に加えて、チャンバー内の減圧によってその影響を受けるコンクリート内の深さが算出される。この深さは実際の減圧される範囲と一致しないとの報告もあるが<sup>9)</sup>、透気係数が  $70 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以上では減圧の影響深さが供試体の部材厚の 200mm を超えたことから、適切に測定されていないと考えたためである。

### 3.2 正規分布に関する検討

図-4 は 18Wall-W と 27Wall-W の両面で測定された透気係数に関する正規確率グラフを示す。既往の研究で報告されているように<sup>7)</sup>、透気係数のプロットは直線とはならず、下に凸の曲線となっている。これはヒストグラムにすると左に偏ったグラフとなり、正規分布しているとは言えない。なお、2本の曲線の違いは期待値の計算に用いる平均値と標準偏差が異なるためである。そこで、透気係数の常用対数をとって測定値の正規性について検討した。図-5 は対数をとった透気係数の正規確率プロットを示す。27Slab-A を除いて、どの供試体も対数をとることによって、正規確率グラフ上で直線のプロットとなっている。また、表-2 は対数をとった透気係数の平均値とその標準偏差およびシャピロ・ウィルク検定結果の P

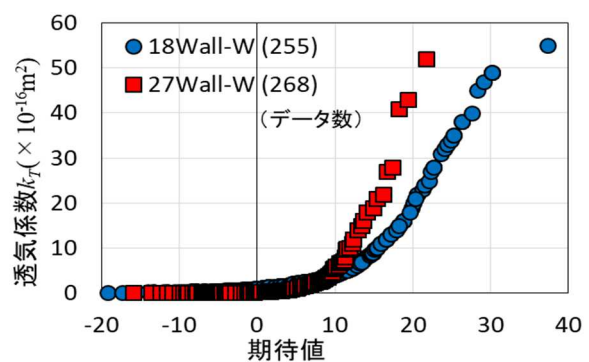


図-4 正規確率グラフ

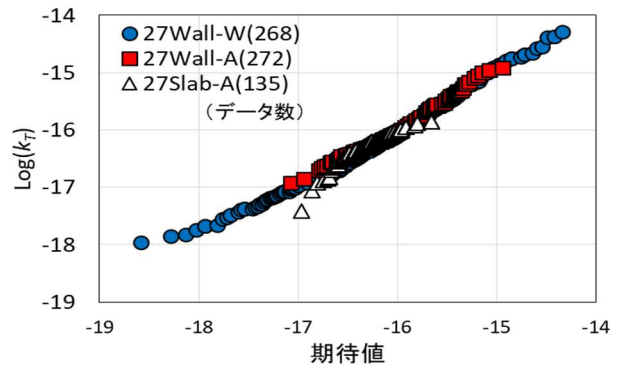
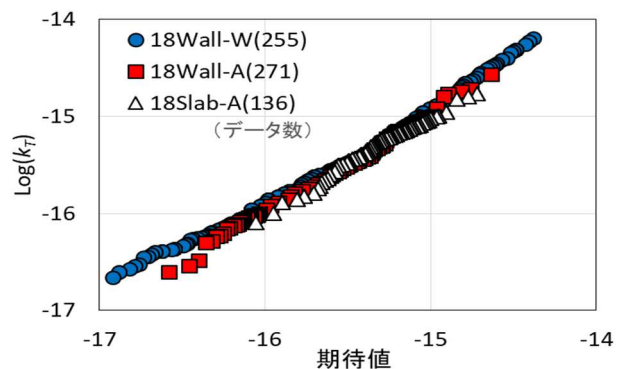


図-5 正規確率グラフ（対数）

値を示す。なお、中央値は対数の透気係数の平均値を 10 のべき乗で表したものであり、[平均値]は対数をとらずに測定された透気係数を平均したものである。

表-2 透気係数の平均値・標準偏差および検

供試体	呼び強度18			呼び強度27		
	18Wall-W	18Wall-A	18Slab-A	27Wall-W	27Wall-A	27Slab-A
データ数	255	271	136	268	272	135
平均値( $\text{Log}_{10}(k_f)$ )	-15.53	-15.61	-15.33	-16.18	-16.01	-16.26
中央値 $k_f(\times 10^{-16}\text{m}^2)$ [平均値]	2.892 [7.543]	2.465 [3.381]	4.628 [5.510]	0.655 [2.905]	0.978 [1.454]	0.547 [0.633]
標準偏差	0.628	0.335	0.268	0.787	0.363	0.262
P値	0.152	0.147	0.0115	0.0042	0.0004	0.00002

表 3 版供試体の分割した透気係数の平均値・標準偏差および検定結果

供試体	18Slab-A				27Slab-A			
	上部	下部	右側	左側	上部	下部	右側	左側
データ数	72	64	67	68	72	61	67	66
平均値( $\text{Log}_{10}(k_f)$ )	-15.35	-15.31	-15.20	-15.46	-16.29	-16.18	-16.26	-16.22
中央値 $k_f(\times 10^{-16}\text{m}^2)$	4.511	2.443	6.303	3.463	0.510	0.667	0.549	0.605
標準偏差	0.250	0.291	0.189	0.279	0.242	0.199	0.279	0.172
P値	0.152	0.0001	0.134	0.877	0.007	0.102	0.002	0.580

P 値から判定すると 18Wall-W と 18Wall-A は正規分布に従っているが、図-5 で直線分布していた 18Slab-A、27Wall-W と 27Wall-A は P 値から判定すると正規分布しているとは言えない。既往の研究において、壁供試体では対数をとっても直線とならないことが報告されており、これはバケットを用いて部材高さまでコンクリートを流し入れたことによると思われる。本研究では壁供試体の打設時にハンドスコップなどを使用して打設を行い壁供試体上下方向で分離の影響を少なくする配慮をしたため、呼び強度 18 の壁供試体においては、上下を区別しなくても対数正規分布したものと考えられるが、呼び強度 27 の壁供試体では既往の研究と同様に上下の材料分離が影響したものと思われる。ただし、版供試体については、別の要因の影響が考えられる。図-6 は 27Wall-W を上下に、18Slab-A を左右に分けた透気係数を正規確率グラフにプロットしたものである。上下は高さの 1/2 で、左右は幅の 1/2 で、それぞれ分割している。P 値はどちらも 0.05 以上であり、上下で、あるいは左右で正規分布に従っている。また、27Wall-W では、上部と下部でプロットの範囲に差があり、下部は上部より小さいほうへシフトしている。従って、壁供試体全体では二つの分布が一緒になり、ピークが二つあるような分布となり正規分布しなかったと思われる。なお、27Wall-A も上下に分けると、正規確率グラフと P 値からそれぞれが正規分布してことを確認できた。一方、表-3 は版供試体で 2 分割して求めた透気係数の平均値と標準偏差および検定結果を示す。なお、表中の上下左右は図-2、3 に対応している。18Slab-A は左右でそれぞれ正規分布したが、27Slab-A はどちらに分割しても一方の P 値が 0.05 を下

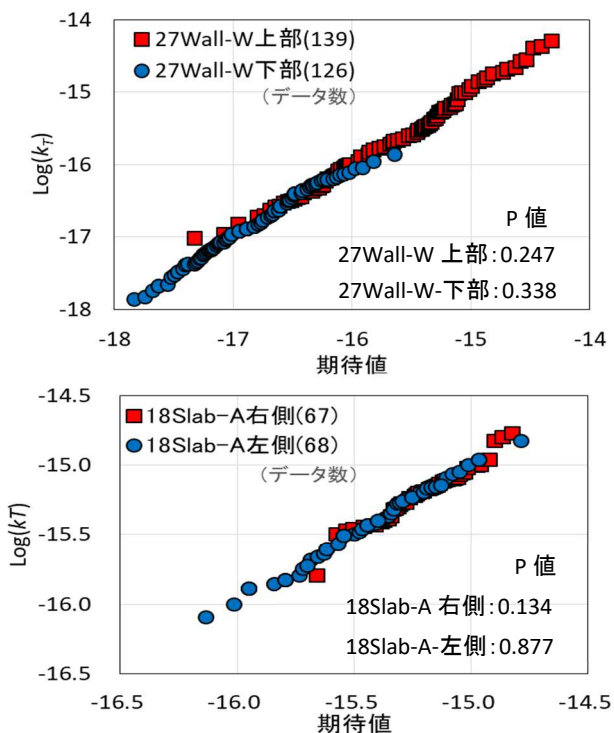


図-6 正規確率グラフ (分割)

回っている。なお、上下左右に 4 等分に分ければ全て直線プロットとなり、P 値は 0.05 より大きな値となった。

### 3.3 透気係数の分布の特徴について

表-2、3 に示す結果から、圧縮強度の違いによって透気係数にも違いが生じているが、養生方法や部材のタイプによって透気係数の平均値には顕著な差はみられない。しかしながら、対数をとった透気係数の標準偏差は湿布養生したものが気中養生より大きく、版供試体より壁供試体のほうが大きくなっている。コンクリートの透気係



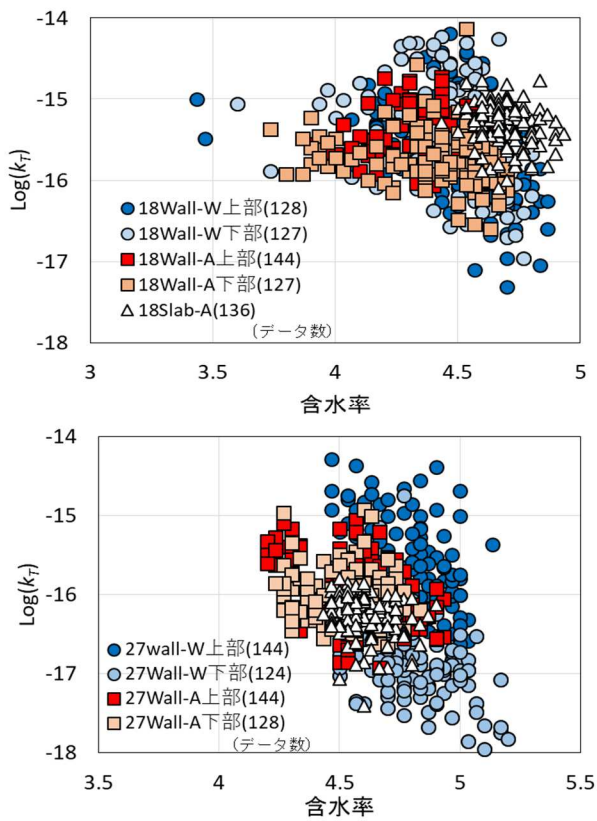


図-7 透気係数と含水率の関係

数には含水率が影響することから、図-7に透気係数と含水率の関係を示す。含水率は透気試験のチャンバーの設置内で3か所測定した平均値を用いている。図からわかるように、概略、透気係数は含水率が大きくなると小さくなっている（相関係数は最も大きい18Wall-Wで0.153である）。湿布養生した供試体では気中養生したものより含水率が高い部分が多くあり、それにより透気係数が小さくなり、結果として透気係数の分布範囲が広がり、標準偏差も大きくなったと思われる。また、27Wall-W以外の壁供試体では含水率の分布範囲と透気係数の分布範囲が上下でほぼ同じであるが、27Wall-Wでは供試体上下で含水率の分布範囲に差はないが、図-6で示したように透気係数の分布範囲が上下で分かれている。このことから、27Wall-Wの透気係数の分布性状には含水率ではなく、材料分離が影響したものと考えられる。一方、版供試体の含水率の分布範囲が壁供試体に比べて小さくなっており、それにより透気係数の変動範囲も小さくなったものと考え

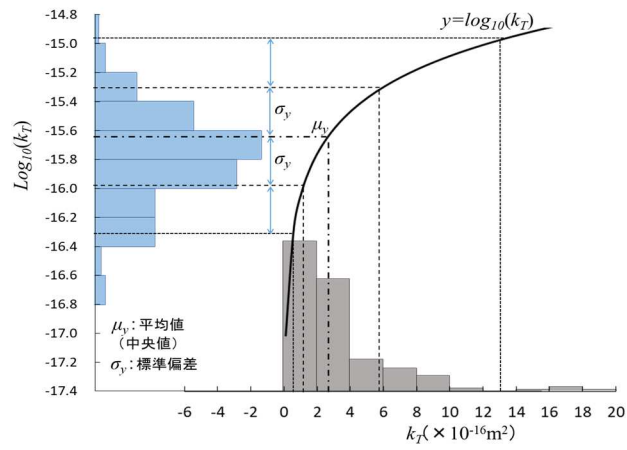


図-8 k\_Tの分布と log10(k\_T)の分布の関係

えられるが、版供試体全体で透気係数が対数正規分布しなかったことに関しては、今後検討する必要がある。

上述のように、対数をとった透気係数のデータに対しては場合によっては範囲を小さくすると正規分布していると言えることから、一般的にそのデータの平均値、中央値および最頻値は一致する。しかしながら、対数をとらない透気係数の分布は図-8に示すように右側にピークが偏った分布となり、最頻値<中央値<平均値の関係となる。対数をとったデータとの関係では対数をとったデータの平均値と、とらないデータの中央値が対応する（図-8参照）。そして、標準偏差の範囲も対数をとった場合は平均値から左右同じであるが、元のデータでは左側の範囲が狭く、右側の範囲が広がる。そこで、コンクリートの透気係数が対数正規分布するとして、透気係数の変動係数を求める。ここで、対数をとらない透気係数の平均値、中央値と標準偏差を  $\mu_x, \mu'_x, \sigma_x$  とし、対数をとった透気係数の平均値と標準偏差を  $\mu_y, \sigma_y$  とする。対数正規分布の確率密度関数は次式で表される<sup>5)</sup>。

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} \exp\left\{-\frac{(\ln(x) - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right\} \quad (2)$$

ここで、 $x$ は対数をとる前のデータである。そして、平均値  $\mu_x$  および分散  $\sigma_x^2$  として次式が得られる。

$$\mu_x = \exp\left(\mu_y + \frac{\sigma_y^2}{2}\right) = \mu'_x \exp\left(\frac{\sigma_y^2}{2}\right) \quad (3)$$

$$\sigma_x^2 = \exp(2\mu_y + \sigma_y^2) \{ \exp(\sigma_y^2) - 1 \} \quad (4)$$

表-4 透気係数の変動係数

供試体	18Wall-W	18Wall-A	18Slab-A右	27Wall-W上	27Wall-A上	27Slab-A下
データ数	255	271	67	139	143	61
平均値(Log <sub>10</sub> (k <sub>T</sub> ))	-15.53	-15.61	-15.20	-15.66	-15.97	-16.18
中央値k <sub>T</sub> (×10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ) [平均値]	2.892 [7.543]	2.465 [3.381]	6.303 [5.510]	2.163 [5.260]	0.986 [1.072]	0.667 [0.661]
標準偏差σ <sub>y</sub>	0.628	0.335	0.268	0.590	0.404	0.199
変動係数CV <sub>x</sub> (%)	143.3	77.1	61.6	135.7	92.9	45.8

また、変動係数  $CV_x$  は定義より  $CV_x = \sigma_x / \mu_x$  と表せるので、(3)、(4)式と  $\mu'_x = \exp(\mu_y)$  を代入すると次式が得られる。

$$CV_x^2 = \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} = \frac{\exp(2\mu_y + \sigma_y^2) \{ \exp(\sigma_y^2) - 1 \}}{\exp(2\mu_y + \sigma_y^2)} = \exp(\sigma_y^2) - 1 \quad (5)$$

ここで  $\exp(z)$  の級数展開による近似式および  $|z| \ll 1$  の時には  $\exp(z) \approx 1 + z$  と近似できるので、 $\exp(\sigma_y^2) \approx 1 + \sigma_y^2$  となる。さらに、以上は自然対数を用いており、透気係数は常用対数をとっているため、透気係数の変動係数は次式で近似的に求まる。

$$CV_x \approx \ln(10)\sigma_y \quad (6)$$

表-4 は本研究で測定された透気係数の変動係数を示す。なお、供試体全体で正規分布しなかったものに関しては分割して正規分布している値を用いている。本研究で得られた透気係数の変動係数は最大で 143% であり、最も小さい値で 46% であった。これは透気試験が種々の影響を受けやすく、敏感な試験であるためと考えられる。

そこで、透気係数が変動しやすいことから所定の範囲内に入る平均値を求めるための測定数について検討する。

統計的手法において、母分散が未知の場合に母平均が信頼率 0.95 で入る区間は次のようになる<sup>9)</sup>。

$$\bar{x} \pm t(n-1, 0.05) \frac{c^* \sigma_0}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

ここで、 $t(n-1, 0.05)$  は t 分布、 $n$  はサンプルサイズある。 $c^*$  はガンマ関数を含む項で、詳細は文献 8) を参照してほしい。 $\sigma_0$  は予め想定しておく標準偏差で、本研究で実験結果に基づいて定めた。

図-7 は(7)式に基づいて求めたサンプルサイズ(測定数)と信頼区間幅の関係を示す。測定数が多くなると当然であるが、信頼区間の幅は狭くなり、設定した標準偏差が小さいほど狭い。信頼区間幅 1.0 は 10 のべき乗では 10 倍の範囲をとる。 $\sigma_0 = 0.60$  は変動係数 138% に対応するもので、測定数 8 回で信頼区間幅が 1.0 以下となる。また、 $\sigma_0 = 0.30$  では測定数 8 回で信頼区間幅が 0.5 以下となり、測定数 4 回でも信頼区間幅が 1.0 以下となる。なお、測定された値は平均するのではなく中央値を求めたほうが良いと思われる。今後、コンクリートの透気係数の代表的な標準偏差を把握すれば、所定の精度で透気係数を評価できる測定回数を決定することができる。

#### 4. 結論

本研究ではコンクリート面部材で測定された透気係数の分布状況について統計手法により検討した。本研究の範囲で得られたことをまとめると以下のとおりである。

(1) コンクリートの透気係数は施工の影響を受けやすいことから、範囲を限定すれば透気係数は対数正規分布する。その範囲は約  $1 \times 1\text{m}$  ～ 約  $0.5 \times 0.5\text{m}$  であった。

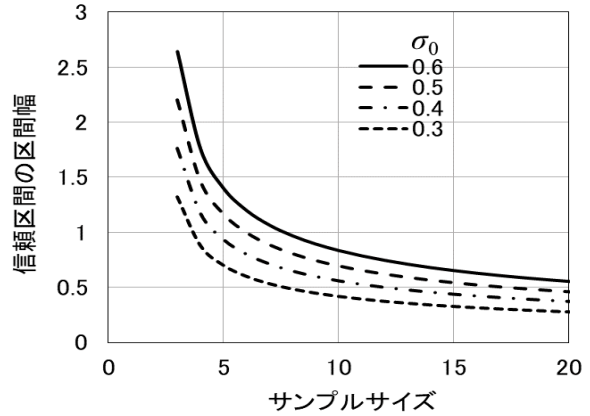


図-9 サンプルサイズと信頼区間幅の関係

- (2) コンクリートの透気係数はコンクリートの含水率と関係しているため、含水率が広く分布する場合には透気係数の標準偏差は大きくなる。
- (3) 対数正規分布するとして求めたコンクリートの透気係数の変動係数は約 50%～150% であり、コンクリートの圧縮強度の変動係数より非常に高い。
- (4) 変動係数が高くても測定数 8 回すなわち測定箇所を 8 か所とすれば、信頼区間幅が 10 のべき乗で 10 倍以内に入る測定が実施可能である。

#### 参考文献

- 1) 今本啓一：コンクリートの表層透気試験方法の現状と課題，コンクリート工学，Vol.53，No.7，pp.606--613，2015.7
- 2) 林和彦，細井暁：コンクリート実構造物に適用できる表面吸水試験方法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1769-1774，2011.7
- 3) 西尾壯平，上田洋，岸利治：コンクリート表面における散水時の明度変化特性および水の流下特性による表層品質の非破壊評価，セメント・コンクリート論文集，Vo.66，pp.303-310，2013.3
- 4) Torrent, R.J., "A two -chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site", Materials and Structures, Vol.25, No.150, pp. 358-365, 1992.7
- 5) 蓑谷千風彦：正規分布ハンドブック，朝倉書店，2012
- 6) 田中章夫，今本啓一，下澤和幸，山崎順二：ダブルチャンバー法を用いた既存鉄筋コンクリート造建築物の中性化予測に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1691-1696，2011.7
- 7) 氏家勲，河合慶有，山川莉希：コンクリートの品質評価のための表層透気係数の測定数について，第 46 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，pp.75-80，2019.11
- 8) 永田靖：サンプルサイズの決め方，朝倉書店，2013