

論文 実大コンクリート壁におけるダブルチャンバー法を用いた表層透気性の評価に関する共通試験

山崎 順二^{*1}・今本 啓一^{*2}・湯淺 昇^{*3}・下澤 和幸^{*4}

要旨：呼び強度の異なる4種類のコンクリート壁を2体作製し、ダブルチャンバー法による同じ測定原理の透気試験機を8台準備し、呼び強度ごとに計6カ所をサンプリングして共通試験（ラウンドロビン・テスト）実施した。各位置から得られた測定値に対して Grubbs の検定を行い、外れ値を棄却した後に相乗平均した値を透気係数の評価値とした結果、測定位置ごとの試験機の違いによる変動係数は概ね 20%~40%であった。また、同一呼び強度における実大コンクリート壁の6カ所で測定した透気係数の変動係数は 40%程度以下となり、既存 RC 構造物の中性化深さの変動係数と概ね同程度であることが分かった。

キーワード：透気性、共通試験、ダブルチャンバー法、変動係数、棄却検定、t 検定

1. はじめに

かぶりコンクリートの品質を非破壊もしくは微破壊で評価するための手法として、これまでに種々の表層透気性試験が研究開発¹⁾され、特にダブルチャンバー法については、現在、土木構造物の表層コンクリートの施工中における品質評価に適用されるようになってきている。しかし、ダブルチャンバー法による測定結果の評価基準は整備されておらず、Swiss Standard などにに基づき評価されているのが現状である。

そこで筆者らは、国内における表層透気性試験方法の規格化およびその後の評価基準の整備を目的として、ダブルチャンバー法による共通試験（ラウンドロビン・テスト）を実施し、測定値の変動とその要因、透気性の評価方法などについて検討することとした。

本論では、ダブルチャンバー法による8台の表層透気試験機を用いた共通試験結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 実大コンクリート壁試験体

実大コンクリート壁は、生コン工場で製造した呼び強度 15（相当）、27、33 および 40 の4種類のコンクリートを15分程度の運搬の後に打ち込んで作製した。

呼び強度 15 相当のコンクリートについては、水セメント比を 85%とし、ブリーディング抑制およびコンシステンシーに配慮し、混和材として砕石粉を 40kg/m³ 使用した。それ以外のコンクリートは全て JIS マーク表示品を使用した。

コンクリートの使用材料および品質を表-1 に、コンクリートの調合概要を表-2 に示す。また、試験体に打

ち込まれたフレッシュコンクリートの受入れ時の性状および硬化後の圧縮強度を表-3 に示す。

実大コンクリート壁試験体は、幅 1,800mm、高さ 900mm、厚さ 200mm のコンクリート壁（無筋）とし、呼び強度ごとに2体ずつ計8体を作製した。打込み後は材齢7日でせき板を脱型し、共通試験に供するまで雨がかりのない屋内環境にて静置した。

2.2 ダブルチャンバー法の測定原理

ダブルチャンバー法の原理は、図-1 に示すように、内部チャンバーと外部チャンバーの二重セル構造のチャンバー、真空ポンプおよび制御装置から構成されており、測定位置での表層透気性は、内部チャンバーの圧力の変化時間から計算によって評価される。測定中の内部チャンバーと外部チャンバーの圧力が等しくなるように外部チャンバーの圧力を制御することによって、内部チャンバー内への外部表層からの空気の流入が物理的に排除され、シングルチャンバー法などで懸念される skin の影響を根本的に解決した試験方法である。ダブルチャンバー法では、図-1 に示したような栓流がコンクリート内部に形成され、この流れは透気性試験のベンチマークとして位置付けられる RILEM TC 116-PCD によって提案された CEMBUREAU 法²⁾のそれと近い形態となる。

測定された圧力変化から、式(1)により透気係数 kT ($\times 10^{-16} \text{m}^2$) が得られる。併せて、式(1)から得られた kT を用いて、試験により影響を受けた概略深さ L (mm) が式(2)から算出される。また、透気性の測定前には校正用のアクリルプレートを用い、セル内への漏気がない状態で12分間のキャリブレーションを行うことによってチャンバー内に漏れる空気の量を測定し、コンクリート面で

*1 (株) 浅沼組 技術研究所 課長 工修 (正会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科 教授 博士 (工学) (正会員)

*3 日本大学 生産工学部 建築工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

*4 (一財) 日本建築総合試験所 構造部 耐震耐久性調査室 室長代理 博士 (工学) (正会員)

表-1 コンクリートの使用材料

材 料	種 類	産地または品名	表乾密度 g/cm ³	粗粒率 または 表積率
セメント	普通ポルトランドセメント	S社製	3.15	—
水	回収水(上澄水)	—	—	—
細骨材	砕砂	大阪府茨木産	2.66	2.80
	山砂	京都府城陽産	2.57	2.80
粗骨材	砕石	大阪府茨木産	2.69	58.0
混和剤	高性能AE減水剤	B社製(標準型)	—	—
	AE減水剤	B社製	—	—
混和材	砕石粉	大阪府高槻産	2.70	—

表-2 コンクリートの調査概要

呼び 強度	水セメ ント比 %	細骨 材率 %	単位量 kg/m ³						
			セメント	水	砕砂	山砂	砕石	混和剤	混和材
15	85	47.8	210	180	442	424	974	2.40(AE)	40
27	54	49.2	333	180	436	424	915	2.90	-
33	47	47.3	383	180	410	398	925	2.99	-
40	40	44.9	450	180	378	365	936	3.51	-

表-3 フレッシュ性状および圧縮強度

呼び 強度	スランブ cm	スランブフロー cm×cm	空気量 %	コンクリート 温度 ℃	圧縮強度 標準28日 N/mm ²
15	13.0	23.0×22.0	3.7	28	14.7
27	19.0	31.5×30.0	4.1	29	34.0
33	15.5	25.0×24.5	5.2	30	42.8
40	19.0	28.0×27.5	5.8	30	53.2

表-4 共通試験時の表面含水率

測定点 呼び強度	含水率 (%)					
	a	b	c	d	e	f
15	4.2	4.1	4.3	4.3	4.4	4.3
27	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.5
33	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
40	4.9	4.9	4.9	4.8	4.8	4.9

の測定値から差し引いて透気係数 kT を算出している。

2.3 共通試験 (ラウンドロビン・テスト)

ダブルチャンバー法による同じ測定原理をもつ同メーカーの試験機で機械のみ異なる透気試験機を 8 台 (試験機の記号: N,D,C,E,H,A,T,R) 準備し, それぞれ同一カ所において表層透気性を測定し, 各測定位置での試験機による変動係数, 呼び強度ごとの測定値の変動係数, 透気性の評価手法などについて検討した。

測定位置は, 実大コンクリート壁 1 体あたり高さ 450mm の位置の中央部およびその左右 (450mm 間隔) の 3 カ所 (a,b,c または d,e,f) とし, 呼び強度ごとに計 6 カ所¹⁾とした。測定面は仕上りのない打放し面とし, 1 カ所につき 1 回ずつ測定した。なお, 打込み後, 材齢 3 ヶ月の時点で共通試験に供した。

試験時の静電容量法による表面含水率を表-4 に示す。呼び強度が大きいほど含水率がやや高くなる傾向にある

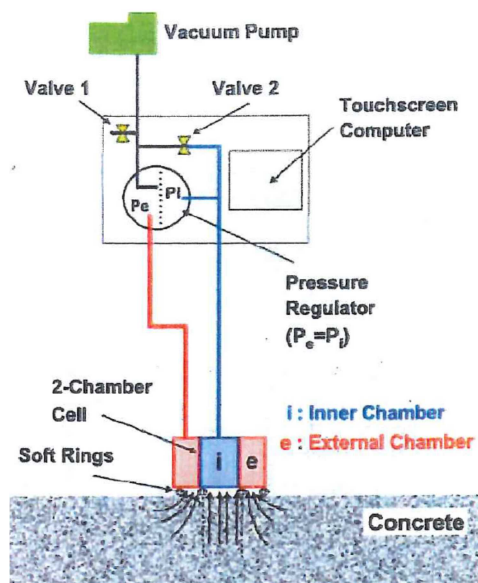


図-1 ダブルチャンバー法のレイアウト

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

$$L \approx 1000 \left\{ \frac{2kTP_a t_f}{\varepsilon \mu} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

ここに,

kT : 空気透過度係数 (m²)

V_c : 内部セルシステムの容積 (m³)

A : 内部セルの断面積 (m²)

μ : 空気の粘性係数 (=2.0×10⁻⁵Ns/m²)

ε : かぶりコンクリートの空隙量 (=0.15m³/m³)

P_a : 大気圧 (N/m²)

ΔP_{ieff} : 試験終了時内部セルの有効圧力上昇 (N/m²)

t_f : 試験終了時間 (s)

t_0 : 試験開始時間 (=60s)

L : 試験により影響を受けた概略深さ (mm)

が, 全測定位置での含水率の範囲は 4.1~4.9%以下, さらに呼び強度ごとの 6 カ所の含水率の差は 0.1%~0.3% の範囲であり, 透気性の測定値に大きな影響を及ぼす程度の含水率およびその差ではない³⁾と考えられる。

2.4 測定値の検定

表層透気性試験による透気性の測定値は, コンクリート表面に生じた微細なひび割れや, 表層コンクリートに潜む局所的な打込み欠陥の存在などにより大きく変動することがある。そのため, 局所的な異常値を含めて平均化して透気性さらには耐久性を評価すると, 構造物全体としての耐久性を適切に評価できないおそれがある。

そこで, N 個の測定値 (本論では 8 台の試験機による

8 個の測定値)のうち、最大値または最小値を異常値(外れ値)として棄却できるかどうかの判別を、JIS Z 8402-2⁴⁾による Grubbs の検定により行うこととした。具体的には、(3)式により統計値 T を求め、Grubbs の棄却検定表に基づき有意水準 5% ($\alpha=0.05$) で棄却検定を行った。

$$T = \frac{n - m}{\sigma} \quad (3)$$

ここに、

T : 統計値

n : 各測定位置における 1 回の測定値

m : 同じ位置で測定した N 個の測定値の平均

σ : 同じ位置で測定した N 個の測定値の標準偏差

3. 試験結果および考察

3.1 コンクリートの透気係数の相関性

RILEM-CEMBUREAU 法による透気係数 K と、ダブルチャンバー法による透気係数 kT の相関性を、実大コンクリート壁と同時に作製した供試体を用いて確認した。試験片は、直径 10cm、高さ 20cm の円柱供試体の最下部からの高さ 5cm (供試体底面が試験面)の部分と、供試体中央部から厚さ 5cm の部分を切り出して成形(供試体切断面が試験面)した試験片を同一呼び強度で 2 組ずつ成形し、両者の手法による透気係数の測定に供した。

ダブルチャンバー法による透気性の測定は試験機 R にて実施した。測定結果を図-2 に示す。ダブルチャンバー法による透気係数 kT は、ベンチマーク試験としての RILEM-CEMBUREAU 法による K 値との間に、寄与率 0.91 と高い相関が認められた。なお、供試体底面と切断面による透気性の測定値に差異は認められなかった。

3.2 実大コンクリート壁の表層透気性

(1) 測定位置ごとの透気係数 kT の変動係数

測定位置は前述の通り呼び強度ごとに片面 6 ヶ所(a,b,c または d,e,f)とし、8 台の試験機(試験機の記号: N,D,C,E,H,A,T,R)を用いてほぼ同位置でダブルチャンバー法による透気係数を測定した。

図-3 に、測定位置ごとに 8 台の試験機で測定された

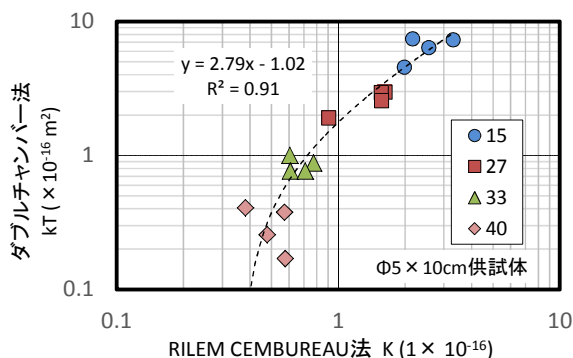
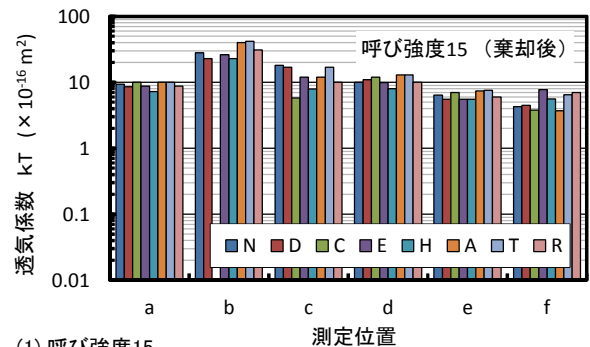
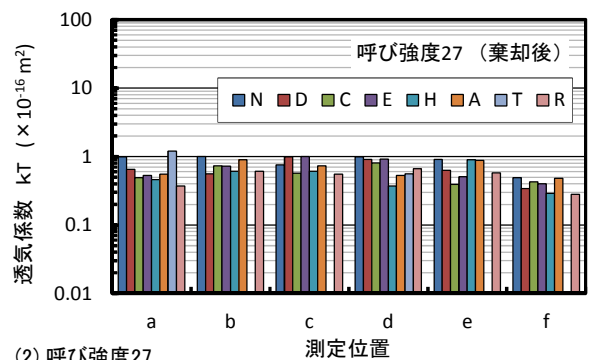


図-2 RILEM 法とダブルチャンバー法の関係

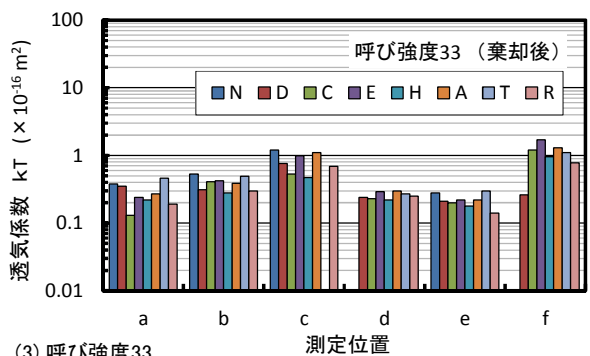
透気係数 kT を呼び強度ごとに示す。8 台の試験機での測定値について、有意水準 5%で棄却された測定値は図中には表示していない。棄却された測定値は、呼び強度 15 が 1 点、27 が 4 点、33 が 3 点、40 が 3 点となり、棄却される数値は試験機 T が比較的多くなった。この理由は明らかではないが、測定位置の若干のずれによる表層コンクリートの密実性の違いや表面の微細なひび割れの影響、アタッチメントの密着性などに加え、測定前に行う試験機ごとのキャリブレーション値も影響している可能



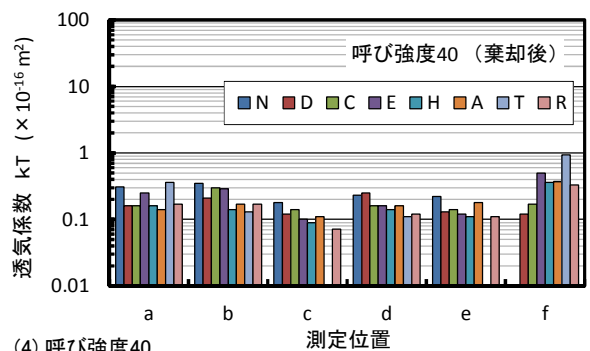
(1) 呼び強度 15



(2) 呼び強度 27



(3) 呼び強度 33



(4) 呼び強度 40

図-3 各測定位置における試験機ごとの透気係数

性が考えられる。これは、測定直前に実施したキャリブレーション値は、試験終了時の内部セルの有効圧力上昇量に影響するためである。

図-4 に、図-3 に示した測定位置ごとの透気係数を相乗平均した値およびその変動係数を呼び強度ごとに示す。相乗平均の算出は、有意水準 5%において検定した結果、異常値と判定される測定値を棄却する前後で算出した値を、図中の点線と実線で併記している。

Grubbs の検定によって測定位置ごとに異常値を棄却することによって、透気係数の平均値の変化は小さいが、変動係数が顕著に低減していることが確認できる。図-4 から、呼び強度 40 の測定位置 f を除けば、試験機の違いによる同一測定位置における変動係数は、概ね 20%~40%程度となることが分かった。

(2) 呼び強度ごとの透気係数 kT の変動係数

実大コンクリート壁 2 体程度の面積をコンクリート構造物の耐久性調査のための 1 つの調査範囲と仮定し、表層コンクリートの品質の違いを含めた呼び強度ごとの透気係数 kT の変動を調査した。今回の共通試験では、前述の通り、同一呼び強度の 2 体の実大コンクリート壁に対して測定位置を 6 カ所¹⁾設定している。

そこで、同じ試験機で測定した 6 カ所 (a,b,c,d,e,f) の測定値に対して Grubbs の検定を行った結果、図-3 に示した透気係数 kT は、呼び強度 15 では測定位置 b、同様に呼び強度 33 では測定位置 c と f、さらに呼び強度 40 では測定位置 f における測定値が、多数の試験機において異常値として棄却される結果となった。検定の結果を呼び強度別に表-5 に示す。表中の数値は透気係数 kT の測定値を示しているが、数値に * (アスタリスク) を付した値が、同じ試験機における測定位置間での測定値に対する検定の結果、有意水準 5% ($\alpha=0.05$ において 1.822 以上) で外れ値 (異常値) と判別された測定位置である。これらの位置の測定値が棄却された原因は、同じ測定位置における試験機間での測定値の差異が比較的小さい傾向にあることから、打込み時の締固めやブリーディングなどの影響によって、表層コンクリートの密実性がその他の測定位置と異なったことによるものと考えられる。図-4 に示す相乗平均の測定位置間の変化を俯瞰しても、棄却された測定位置の透気係数 kT は、その他の測定位置の kT とはやや乖離していることが伺える。

表-6 に、図-4 に示した呼び強度ごとの測定位置間の透気係数 kT の有意差の有無を、t 検定により評価した結果を示す。呼び強度 15 については、貧調査かつ低強度であり表層コンクリートの品質がブリーディングなどの影響によってその他の呼び強度のコンクリートよりも差異が大きくなるためか、有意水準 1%または 5%で有意差ありと評価される測定位置の組合せが多くなっている。

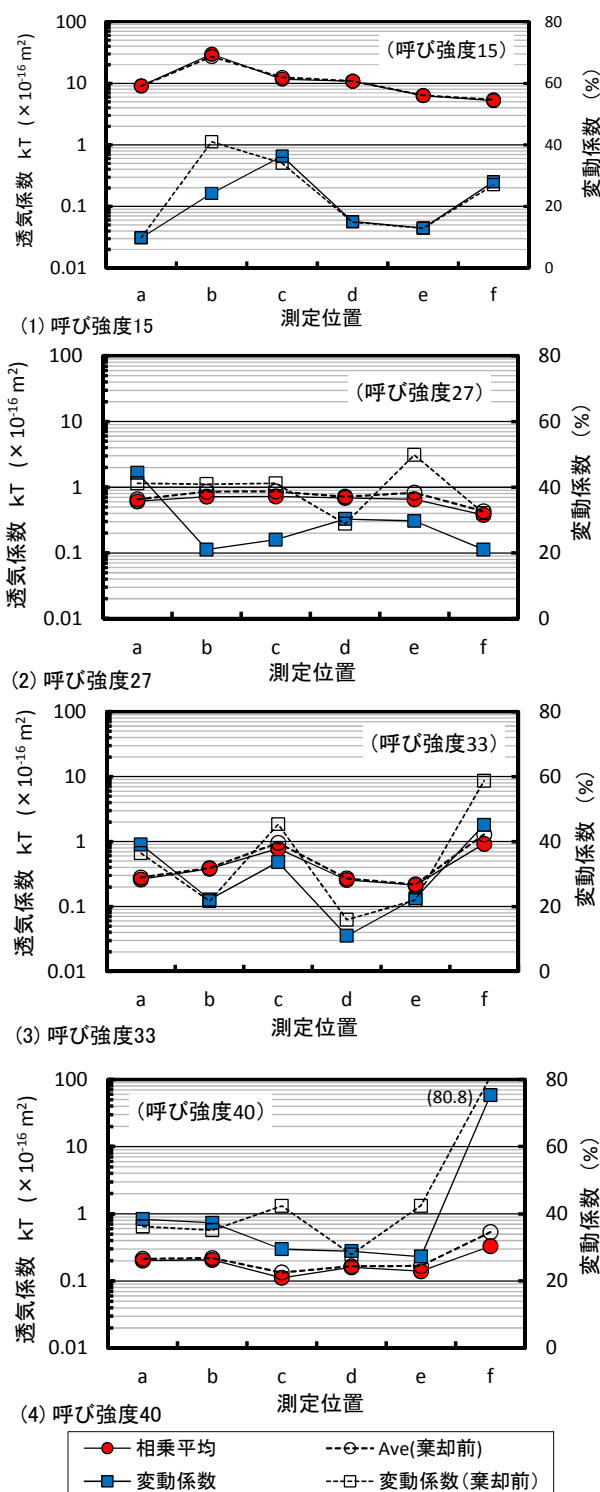


図-4 各測定位置における透気係数平均値と変動係数

また、呼び強度 27 の測定位置 f や、呼び強度 33 の測定位置 b については、その測定位置のみが、その他の測定位置の表層コンクリートの品質とは異なる特異点であったとみなすべきと考えられる。

3.3 実大コンクリート壁の表層透気性の評価

図-5 に、表-5 に示した同一試験機における測定位置間の Grubbs の検定により棄却された測定値を除いた相乗平均により得られた透気係数 kT と、それらの変動

表-5 同一試験機での測定位置間の Grubbs 検定

試験機 記号	測定位置 (呼び強度40)					
	a	b	c	d	e	f
N	0.31	0.35	0.18	0.23	0.22	1.50 *
D	0.16	0.21	0.12	0.25	0.13	0.12
C	0.16	0.30 *	0.14	0.16	0.14	0.17
E	0.25	0.29	0.10	0.16	0.12	0.50 *
H	0.16	0.14	0.09	0.14	0.11	0.36 *
A	0.14	0.17	0.11	0.16	0.18	0.37 *
T	0.36	0.13	0.26	0.11	0.33	0.93 *
R	0.17	0.17	0.07	0.12	0.11	0.33 *
試験機 記号	測定位置 (呼び強度33)					
	a	b	c	d	e	f
N	0.38	0.53	1.20	0.36	0.28	3.00 *
D	0.35	0.31	0.76 *	0.24	0.21	0.26
C	0.13	0.41	0.53	0.23	0.20	1.20 *
E	0.24	0.42	0.99	0.29	0.22	1.70 *
H	0.22	0.28	0.47	0.22	0.18	0.96 *
A	0.27	0.39	1.10	0.30	0.22	1.30
T	0.46	0.49	1.90 *	0.27	0.30	1.10 *
R	0.19	0.30	0.69	0.25	0.14	0.78
試験機 記号	測定位置 (呼び強度27)					
	a	b	c	d	e	f
N	0.99	1.00	0.76	0.99	0.91	0.49 *
D	0.65	0.56	0.99	0.91	0.63	0.34
C	0.49	0.73	0.57	0.81	0.39	0.43
E	0.53	0.72	1.00	0.92	0.51	0.40
H	0.46	0.61	0.61	0.37	0.90	0.29
A	0.55	0.90	0.73	0.53	0.88	0.48
T	1.20	1.70	1.70	0.56	1.80	0.74
R	0.37	0.61	0.55	0.66	0.58	0.28
試験機 記号	測定位置 (呼び強度15)					
	a	b	c	d	e	f
N	9.40	28.0 *	18.00	10.00	6.40	4.30
D	8.60	23.0	17.00	11.00	5.50	4.50
C	10.00	3.70	5.80	12.00	7.00	3.80
E	8.70	26.0 *	12.00	9.90	5.50	7.80
H	7.30	23.0 *	7.90	8.00	5.50	5.60
A	10.00	40.0 *	12.00	13.00	7.40	3.70
T	10.00	42.0 *	17.00	13.00	7.60	6.50
R	8.70	31.0 *	10.00	10.00	6.00	7.00

表-7 kT に基づく表層コンクリートの透気性の分類⁵⁾

Class	kT ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$)	Permeability
PK1	<0.01	Very Low
PK2	0.01-0.1	Low
PK3	0.1-1.0	Moderate
PK4	1.0-10	High
PK5	>10	Very High

係数を示す。両図には試験機ごとの透気係数 kT を示しているが、今回の共通試験に用いた実大コンクリート壁の2面程度の面積を構造物の耐久性調査の範囲と仮定すると、Grubbs の検定に基づき異常値を選別した後に相乗平均することによって、表層コンクリートの透気係数が表-7 に示す指標 (ASTM C 1202 に対応) によれば「Moderate」または「High」と判定され、いずれの試験

表-6 呼び強度別の測定位置間での t 検定結果

呼び強度 15	測定位置				
	b	c	d	e	f
a	++	0	+	++	++
b	-	++	++	++	++
c	-	-	0	++	++
d	-	-	-	++	++
e	-	-	-	-	0
呼び強度 27	測定位置				
	b	c	d	e	f
a	0	0	0	0	+
b	-	0	0	0	++
c	-	-	0	0	++
d	-	-	-	0	++
e	-	-	-	-	++
呼び強度 33	測定位置				
	b	c	d	e	f
a	+	++	0	0	++
b	-	++	++	++	++
c	-	-	++	++	0
d	-	-	-	0	++
e	-	-	-	-	++
呼び強度 40	測定位置				
	b	c	d	e	f
a	0	+	0	0	0
b	-	++	0	+	0
c	-	-	+	0	0
d	-	-	-	0	0
e	-	-	-	-	+

+:有意水準5%(++:1%)で有意差あり, 0:有意差なし

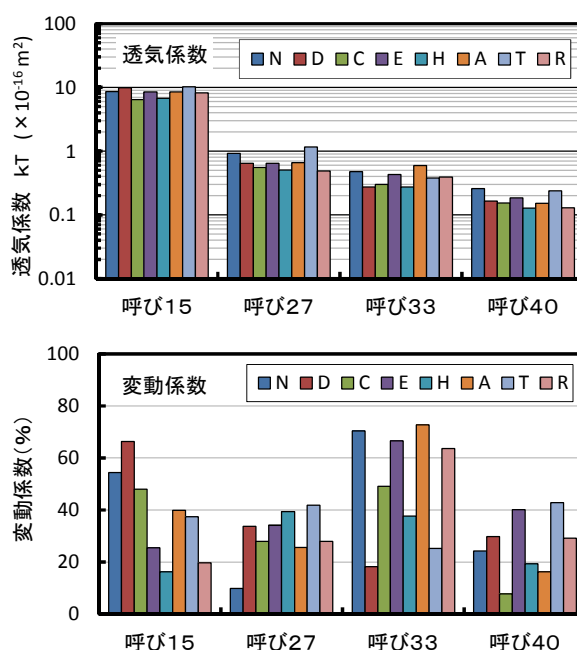


図-5 呼び強度ごとの透気係数および変動係数

機においても、概ね相違なく適切に評価されている。

また、変動係数については、測定位置間における t 検定によって有意差ありと判別された組合せが比較的多い呼び強度 15 と呼び強度 33 については、いくつかの試験機において変動係数が 60%程度を示しているが、呼び強度 27 および呼び強度 40 も併せて考慮すると、同一調査

範囲内における測定位置の違いに起因する変動係数は、概ね 40%以下（全平均は 36%）となることが分かった。

4. 透気係数による構造体コンクリートの耐久性評価

既存 RC 構造物における中性化深さの変動係数は、中性化深さが大きくなるほど小さくなる傾向にあるが、平均中性化深さが 15mm 程度以下の場合を除けば概ね 20%～40%程度⁶⁾とされている。また、旧建設省マンション総プロでは、日本建築学会「鉄筋コンクリート造構造物の耐久設計施工指針(案)・同解説」に示されている 10%よりも大きく、その変動係数を 40%⁷⁾と報告している。

一方、今回の共通試験によって得られた透気係数 kT を Grubbs の検定によって異常値を棄却すれば、透気係数 kT の変動係数は、試験機および調査範囲内での測定位置等の要因による影響を受けることにより概ね 40%程度以下となり、その数値は既存 RC 構造物の中性化深さの変動係数と概ね同程度となるが、図-6⁸⁾や文献⁹⁾などから、共通試験から得られた透気係数 kT の変動量が中性化速度係数の大きさに及ぼす影響は僅かであるといえる。

以上のことから、原位置において数カ所（サンプリング数は概ね 6 点以上¹⁾）の測定位置から得られた透気係数について、表層コンクリートの粗密や微細ひび割れなどに起因する異常値（外れ値）を Grubbs の検定によって棄却し、相乗平均により透気係数の評価値を得る手法によれば、透気係数 kT は、構造体コンクリートの中性化深さに基づく耐久性の評価指標になり得ると考えられる。

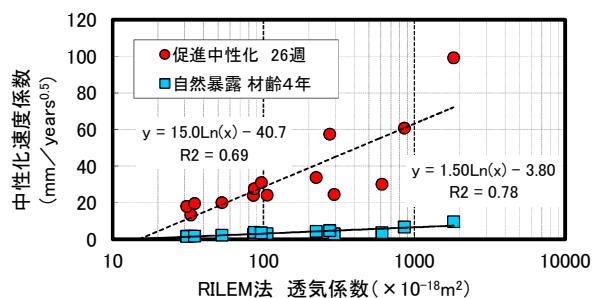


図-6 中性化速度係数と RILEM 透気係数の関係⁸⁾

5. まとめ

ダブルチャンバー法による 8 台の透気試験機を使用し、呼び強度の異なる 4 種類の実大コンクリート壁において共通試験を実施した。得られた結果を以下に述べる。

- (1) 同じ測定位置における 8 台の試験機の違いによる透気係数 kT の変動係数は、20%～40%である。
- (2) 同じ呼び強度の実大コンクリート壁 2 体から 6 カ所の測定位置をサンプリングして得られた同一試験機による透気係数の変動係数は、概ね 40%程度である。
- (3) 得られた測定値を、Grubbs の検定による異常値の棄却や、 t 検定による有意差の確認などを行い選別する

ことによって、透気性による表層コンクリートの中性化深さに基づく耐久性評価が可能になると考える。

今後、各種の透気性試験の結果を併せて検討を加え、各種の透気性試験方法の規格化、更には、表層透気性による RC 構造物の構造体コンクリートの耐久性評価手法の確立を目指したい。

謝辞

本論文は、(一社)日本非破壊検査協会に設置されている「表層透気性試験方法研究委員会」において実施した共通試験の結果の一部をまとめたものである。研究委員会の関係各位にはここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 今本啓一：コンクリートの表層透気性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) RILEM TC116-PCD, Recommendation of TC116-PCD, Tests for gas permeability of concrete. B. Measurement of gas permeability of concrete by RILEM-CEMBUREAU method, Mater. & Struct, Vol.25, No.150, pp.358-365, July 1992
- 3) 山崎順二，今本啓一，下澤和幸，永山勝，二村誠二：簡易透気性試験によるコンクリートの耐久性評価に関する研究 その 1 簡易透気速度に影響を及ぼす各種要因に関する検討，日本建築学会学術講演梗概集（近畿），pp.1177-1178, 2005.9
- 4) JIS Z 8402-2, 7.3.4
- 5) Roberto Torrent, Frank Jacobs : Swiss Standard SIA 262: 2003, A step towards performance-based specifications for durability, Concrete in Aggressive Aqueous Environments, Performance, Testing and Modeling, pp.532-539, Toulouse, France, 2009.6
- 6) 平松和嗣：既存 RC 建物構造体の実用的な耐久性評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.1, pp.831-836, 2007
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造構造物の耐久設計施工指針（案）・同解説，p.108, 2004
- 8) 山崎順二，今本啓一，下澤和幸，永山勝：簡易透気性試験による RC 構造体の耐久性評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.1, pp.1769-1774, 2010.7
- 9) Kei-ichi Imamoto, Kazuyuki Shimozaawa, Masaru Nagayama, Junji Yamasaki and Akio Tanaka : Relationship between air permeability and carbonation progress of concrete in Japan PRO 89: RILEM International workshop on performance-based specification and control of concrete durability, pp.325-332, Zagreb, Croatia, 2014