

# 論文 コンクリートの透気性と中性化抵抗性の関連に基づく透気試験の評価指標の検討

下澤 和幸\*1・山崎 順二\*2・今本 啓一\*3

**要旨:** 国内では、実構造物の建設時における品質管理の一つの手段として、非破壊試験が導入されるようになり、特に表層透気試験であるダブルチャンバー法 [Torrent 法] が、かぶりコンクリートの品質評価に適用されてきている。しかし、本試験の測定値の評価基準は未だ整備されておらず、その評価には海外での検査指針等に示された基準値を参照しているのが現状である。本論では、実構造物を模擬したコンクリート試験体による透気試験や物性のデータをもとに、透気係数と中性化速度係数との関係を求め、ダブルチャンバー法による透気試験データを評価するための指標値の一案を示した。

**キーワード:** 透気性, ダブルチャンバー法, 中性化速度係数, 評価指標

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性を確保する観点から、劣化因子の侵入を最小限に止めるための方策として、適正なかぶり厚さとともにかぶりコンクリートを緻密とすることが挙げられる。このうち、かぶりコンクリートの緻密度を評価するための非破壊あるいは微破壊による表層透気試験は、古くより国内外において研究されてきた。これらの表層透気試験は、研究者により試験方法や閾値が提案されているものの、試験規格や評価基準としては未だ示されていない。これら背景のもと、コンクリートの施工に関するスイス規格 (SIA 262:2003) には、耐久性の観点からかぶりコンクリートの品質の重要性が示され、実構造物の品質を透気試験等の方法により検査することが盛り込まれている。その具体的な動きとして、スイス連邦道路局では検査指針が作成されており、試験方法としてダブルチャンバー法 [Torrent 法]<sup>1)</sup>が特定され、透気係数の評価値 (推奨値) が表-1 のとおり示されている<sup>2)</sup>。一方、国内では 2010 年前後より急速に普及したダブルチャンバー法が実構造物の品質評価に用いられるようになってきたが、その評価は構造物の表層品質の比較評価に留まっている。

そこで、ダブルチャンバー法による透気係数を評価するための国内における指標値を検討することとした。本論では、建築用 (基準スランプ 18cm) として調合計画した 10 水準の呼び強度によるコンクリートにより作製した実大壁や壁形試験体を対象として、透気係数や物性データを求め、透気性と中性化抵抗性との関連<sup>例え ば 3)</sup>に基づく、ダブルチャンバー法による透気係数を評価するための指標値の一案を検討した結果について述べる。

表-1 コンクリートの品質管理に関する指針における透気係数の基準値 (スイス連邦道路局)<sup>2)</sup>

種類	A	B	C	D	E	F	G
強度クラス	C25/30	C25/30	C30/37	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37
環境区分	XC1 XC2	XC3	XC4 XF1	XC4, XD1 XF2	XC4, XD1 XF4	XC4, XD3 XF2	XC4, XD3 XF4
最小セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	280	280	300	300	300	320	320
最大水セメント比 W/C (%)	65	60	50	50	50	45	45
推奨現場透気係数 kTs (10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> )	—	—	2.0	2.0	2.0	0.50	0.50

注) 環境区分: XC (中性化), XF (凍害), XD (海水以外の作用) による腐食環境を示す。

## 2. 各試験方法の概要

本検討には、次の各試験により求めたデータを用いた。

### 2.1 RILEM Cembureau 法

本試験方法 (以下、RILEM 法と記す) は、RILEM TC116-PCD<sup>4)</sup>によって提案された試験方法であり、特に海外においてはベンチマーク試験として位置づけられている。試験には、直径 150mm、厚さ 50mm の円板状試験体を用い、試験前処理として 50°C の環境下で乾燥させる。試験体は、図-1 に示す試験セルに格納し、試験体周囲を気密にした状態で圧力を印加して、その状態における透気量から式(1)のハーゲン・ポアズイユ則により透気係数  $K$  (m<sup>2</sup>) を求める。

$$K = \frac{2QP_aL\mu}{A(P^2 - P_a^2)} \quad (1)$$

ここに、 $Q$  は透気量 (m<sup>3</sup>/s)、 $P$  は印加圧力 (N/m<sup>2</sup>)、 $L$  は試験体厚さ (m)、 $\mu$  は気体の粘性 (Ns/m<sup>2</sup>)、 $A$  は試験体断面積 (m<sup>2</sup>) および  $P_a$  は大気圧 (N/m<sup>2</sup>) である。

\*1 (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)

\*2 (株) 浅沼組技術研究所 課長 博士 (工学) (正会員)

\*3 東京理科大学 工学部建築学科 教授 博士 (工学) (正会員)

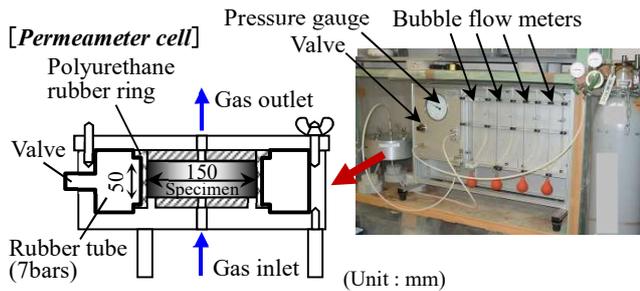


図-1 RILEM Cembureau 法

## 2.2 ダブルチャンバー法 [Torrent 法] <sup>1)</sup>

本試験方法（以下、DC 法と記す）は、R.Torrent によって 1992 年に発表され、上述した RILEM 法とほぼ一致する空気流を原位置試験で実現した方法である。同法は図-2 のとおり、内部と外部の 2 つのチャンバー内を減圧させながら、各チャンバー内の圧力を等しく制御し、減圧開始 60 秒以降の内部チャンバー直下からの栓流による同チャンバー内の圧力変化量とその経過時間から、式(2)によって透気係数  $K_T$  を求める。

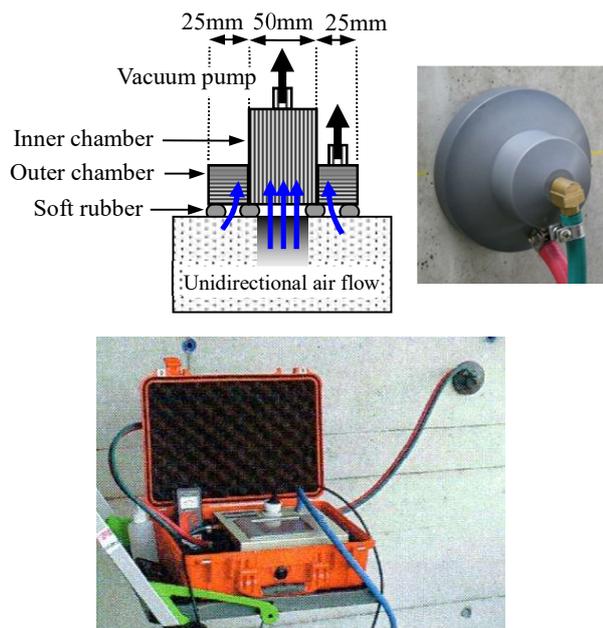


図-2 ダブルチャンバー法 [Torrent 法]

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

ここに、 $V_c$  は内部チャンバーシステムの容積 ( $\text{m}^3$ )、 $A$  は栓流 [内部チャンバー] の断面積 ( $\text{m}^2$ )、 $\mu$  は空気の粘性係数： $2.0 \times 10^{-5} (\text{Ns}/\text{m}^2)$ 、 $\varepsilon$  は本法で仮定したコンクリートの空隙量： $0.15 (\text{m}^3/\text{m}^3)$ 、 $P_a$  は大気圧 ( $\text{N}/\text{m}^2$ )、 $\Delta P_i$  は試験終了時の内部チャンバーの上昇圧力 ( $\text{N}/\text{m}^2$ )、 $t_f$  は試験終了時間 (s) および  $t_0$  は試験開始時間 (s) である。

## 2.3 促進中性化試験

コンクリートの促進中性化試験は、JIS A 1153 : 2003 または 2012 (コンクリートの促進中性化試験方法) に従い、 $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$  の角柱試験体を作製し、温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度  $60 \pm 5\%$  および  $\text{CO}_2$  濃度  $5.0 \pm 0.2\%$  の環境下に材齢 26 週まで静置させた後、中性化深さを求めた。

## 3. 実験概要

本検討には、国内で検討が進められている各種透気試験方法 (シングルチャンバー法、ドリル削孔法および DC 法) の規格化と評価基準の確立を目的として実施した 3 つの共通試験 (以下、実験 I、実験 II および実験 III と記す) において得られた、DC 法による透気係数や物性試験の各データを用いた。なお、各実験では 2 章に示した試験以外に、JIS A 1108 : 2006 (コンクリートの圧縮強度試験方法) に従い、標準養生した試験体の材齢 28 日の圧縮強度を求めている。

### 3.1 実験 I

実験 I では、生コン工場で製造された呼び強度 21, 27 および 36 の 3 水準のコンクリートを用いた。各コンクリートは、水 (W) は上水道水、セメント (C) は普通ポルトランドセメント (密度  $3.16 \text{ g}/\text{cm}^3$ )、細骨材 (S) は、山砂 (城陽産、密度  $2.75 \text{ g}/\text{cm}^3$ , FM2.80) を 70% と砕砂 (高槻産、密度  $2.66 \text{ g}/\text{cm}^3$ , FM 2.80) を 30% として混合したもの、粗骨材 (G) は砕石 (高槻産、密度  $2.69 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 実績率 58.0%)、混和剤 (Ad) は AE 減水剤 (AE: リガコンソルフオン酸系)、または高性能 AE 減水剤 (SP: ポリカルボン酸エーテル系) を用いた。コンクリートの計画調合を表-2 に示す。

試験体は、 $H3600 \times W2400 \times D200 \text{ mm}$  の実大壁試験体 (写真-1 を参照) であり、コンクリート打込み後 2 日で脱型し、その後は自然環境下で暴露した。本試験では、DC 法による透気試験を実大壁試験体の材齢 12 週時に、また、RILEM 法による透気試験を実大壁試験体より採取した  $\phi 150 \text{ mm}$  コアを厚さ 50mm に切断成形し、所定の試験前処理を行った後に実施した。

表-2 コンクリートの計画調合 (実験 I)

呼び強度	W/C (%)	s/a (%)	単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )					スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	Ad.		
21	63	46.6	184	292	826	974	AE:3.10	16.0	5.9
27	54	49.2	180	333	860	915	SP:2.90	9.5	5.0
36	44	48.7	180	409	821	890	SP:4.13	21.5	5.5

### 3.2 実験 II

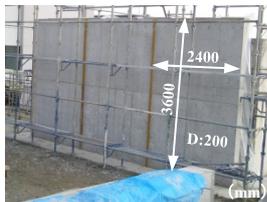
実験 II では、生コン工場で製造された呼び強度 18 (相当)、24 および 30 の 3 水準のコンクリートを用いた。各コンクリートは、水 (W) は回収水、セメント (C) は普通ポルトランドセメント (密度  $3.15 \text{ g}/\text{cm}^3$ )、細骨材には山

砂(S1) (城陽産, 密度 2.57 g/cm<sup>3</sup>, FM2.80) と砕砂(S2) (茨木産, 密度 2.66 g/cm<sup>3</sup>, FM 2.80) を混合したもの、粗骨材(G)は砕石 (茨木産, 密度 2.69 g/cm<sup>3</sup>, 実績率 58.0%), 混和剤(Ad)は AE 減水剤(AE: リグニンスルホン酸系), または高性能 AE 減水剤 (SP: ポリカルボン酸エーテル系) を用いた。コンクリートの計画調合を表-3 に示す。

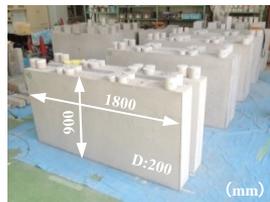
試験体は、外形寸法 H900×W1800×D200mm の壁形試験体 (写真-1 を参照) であり、コンクリート打込み後は、材齢 7 日目に脱型し、雨掛かりのない室内 (温湿度は外気とほぼ同等) に静置した。本実験では、DC 法による透気試験を壁形試験体の材齢 26 週時に、また、RILEM 法による透気試験を同一コンクリートにより作製したφ150mm 円柱試験体を厚さ 50mm に切断成形し、所定の試験前処理を行った後に実施した。

表-3 コンクリートの計画調合 (実験 II)

呼び強度	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )						スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S1	S2	G	Ad.		
18	67	46.6	180	270	412	427	990	AE 3.24	11.5	3.4
24	57	49.9	180	316	434	447	909	SP 2.94	18.5	5.2
30	50	48.3	180	360	409	426	920	SP 2.92	18.0	5.6



実大壁試験体



壁形試験体

写真-1 コンクリート試験体

### 3.3 実験 III

実験 III では、生コン工場で作製された呼び強度 15 (相当), 27, 33 および 40 の 4 水準のコンクリートを用いた。各コンクリートは、上記 3.2 節 (実験 II) で使用した同一性状の材料を用いて、表-4 に示したコンクリートの計画調合により製造した。

試験体は、上記 3.2 節 (実験 II) と同形状の壁形試験体であり、コンクリート打込み後の養生も同様とした。本実験では、DC 法による透気試験を壁形試験体の材齢

表-4 コンクリートの計画調合 (実験 III)

呼び強度	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )						スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S1	S2	G	Ad.		
15	85	47.8	180	210	424	442	974	AE 2.40	13.0	3.7
27	54	49.2	180	333	424	436	915	SP 2.90	19.0	4.1
33	47	47.3	180	383	398	410	925	SP 2.99	15.5	5.2
40	40	44.9	180	450	365	378	936	SP 3.51	19.0	5.8

注) 呼び強度 15 には砕石粉 (密度 2.70g/cm<sup>3</sup>) を 40kg/m<sup>3</sup> 混和している。

13 週時に、また、RILEM 法による透気試験を同一コンクリートにより作製したφ100mm 円柱試験体を厚さ 50mm に切断成形し、所定の試験前処理を行った後に実施した。

## 4. 各試験結果

3 章で示した各実験の結果を、実施した試験ごとに纏め、次に示した。なお、呼び強度 27 は実験 I と実験 III に用いているため、27-1 (実験 I) および 27-3 (実験 III) と表し、計 10 水準の呼び強度について結果を示している。

### 4.1 コンクリートの圧縮強度

コンクリートの圧縮強度は、図-3 のとおり、呼び強度 21 と 24 の間で若干逆転してはいるが、呼び強度の増大に伴い、大きくなる傾向を示している。これは、呼び強度の大小による品質の差異が示されており、実大試験体等の作製には計画した品質のコンクリートが用いられていると考える。

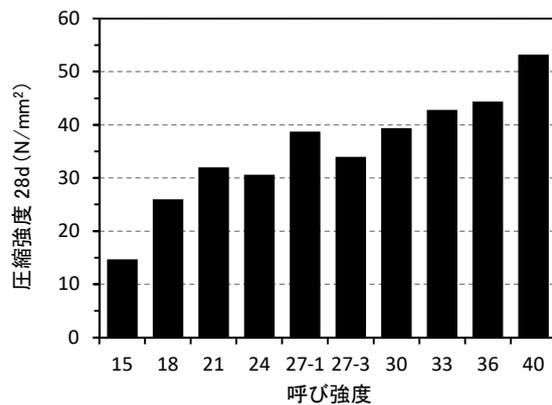


図-3 コンクリートの圧縮強度

### 4.2 RILEM 法による透気試験

RILEM 法による透気係数 K は、図-4 のとおり、呼び強度の大小関係における逆転が見られるものもあるが、呼び強度が増大するに伴い、概ね小さくなる傾向を示している。

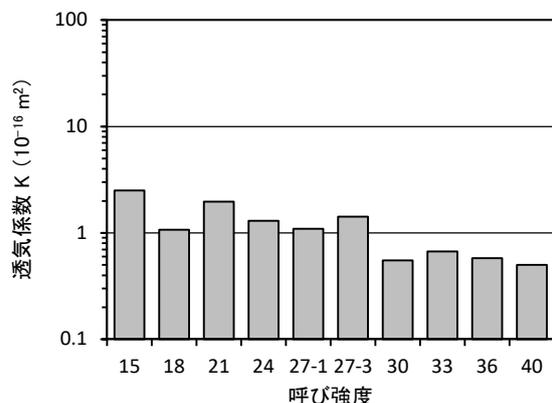


図-4 RILEM 法による透気係数 K

### 4.3 DC 法による透気試験

DC 法による透気係数  $K_T$  は、1 試験体における 3 点あるいは 6 点の測定値から異常値を検定により棄却し、相乗平均した値を用いた。これら測定値の変動係数は 40% 程度である。透気係数  $K_T$  は、図-5 のとおり、呼び強度 21 と 24 の間で若干逆転してはいるが、呼び強度が増大するに伴い、小さくなる傾向を示している。

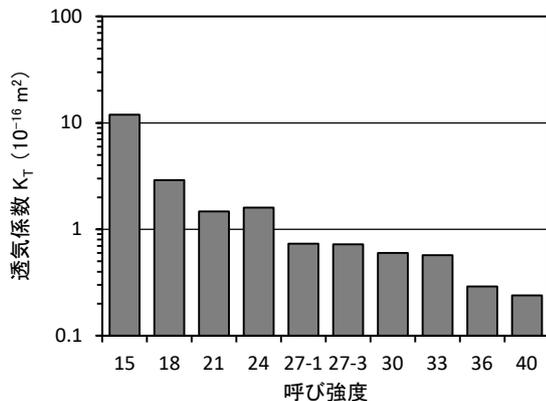


図-5 DC 法による透気係数  $K_T$

### 4.4 促進中性化試験

促進試験によるコンクリートの中性化深さは、図-6 のとおり、呼び強度 27-3 は 27-1 に比して 10mm 程度大きいですが、呼び強度が増大するに伴い、概ね小さくなる傾向を示している。

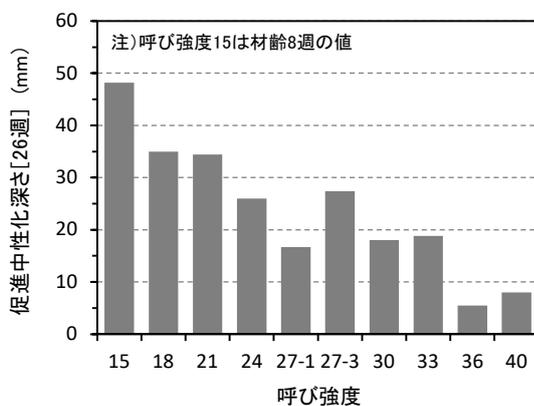


図-6 コンクリートの促進中性化深さ

## 5. 透気試験の評価指標の検討

本検討は、透気係数  $K_T$  と中性化速度係数の関係をもとに実施した。

### 5.1 透気係数 $K_T$ について

DC 法の試験における空気流は、2.2 節でも記したとおり RILEM 法のそれと近いものとなり、Torrent が行った実験<sup>9)</sup>では図-7 のとおり、DC 法による透気係数と RILEM 法の間には良い相関が認められている。ここで同様に、本検討に用いた各法の透気係数の関係を図-8 に

示す。同図におけるデータには多少のばらつきはあるものの、プロットされた範囲での両対数グラフにおける線形の関係と、図-7 の同範囲における傾向は概ね一致していると判断した。また、透気係数  $K_T$  の変動係数は 40% 程度であり、既存の鉄筋コンクリート構造物の中性化深さの変動係数<sup>9)</sup>と概ね同程度となることから、透気係数  $K_T$  の変動量が中性化速度係数の大きさに及ぼす影響は小さいと判断し、図-5 に示した透気係数  $K_T$  を評価指標の検討に用いることとした。

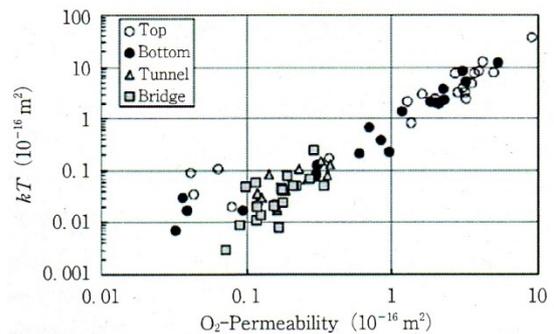


図-7 RILEM 法の透気係数 (X 軸) と DC 法の透気係数 (Y 軸) の関係<sup>5)</sup>

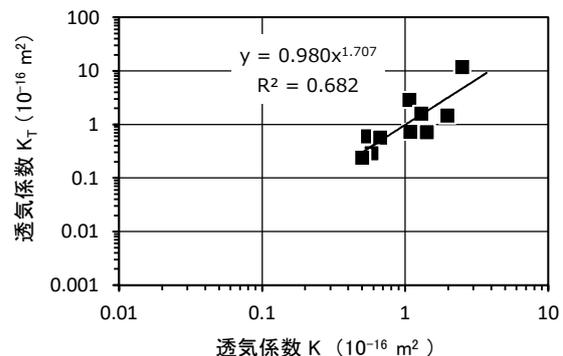


図-8 RILEM 法の透気係数  $K$  と DC 法の透気係数  $K_T$  の関係

### 5.2 中性化速度係数について

検討には、次の 2 つの中性化速度係数を用いた。

一方は、JASS 5<sup>7)</sup>を参照し、計画供用期間の各級における耐久設計基準強度を定めるために引用されている文献 8) に示された、標準養生した試験体の材齢 28 日の圧縮強度と、試験体の屋外暴露試験に基づく中性化速度係数との関係を近似した図-9 中の回帰式により算出した中性化速度係数  $A$  とした。

また他方は、文献 8) に倣い、本論の各実験で得られた標準養生した試験体の材齢 28 日の圧縮強度と、促進試験 (試験期間: 26 週) による中性化深さから  $\sqrt{t}$  則  $[C=A\sqrt{t}]$  に基づき求まる中性化速度係数との関係を、最小二乗法により近似した図-10 中の回帰式により算出し

た中性化速度係数  $A_a$  とした。ここで、中性化速度係数  $A_a$  を上記のとおりに求めたのは、図-6 に示した促進中性化深さから求めた中性化速度係数では、コンクリートの使用材料の産地や性状はほぼ同じであるものの、別々の時期に行った実験であるため、総括的にその傾向を把握してデータを扱うのがよいと判断したためである。

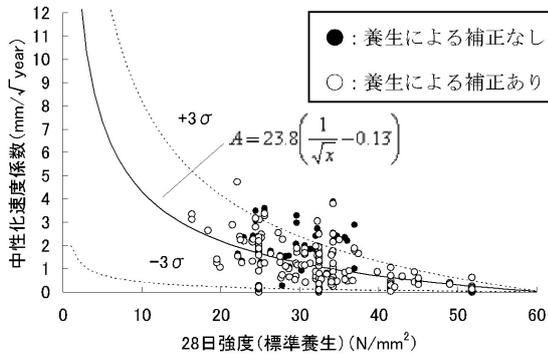


図-9 28日強度と中性化速度係数の関係<sup>8)</sup>

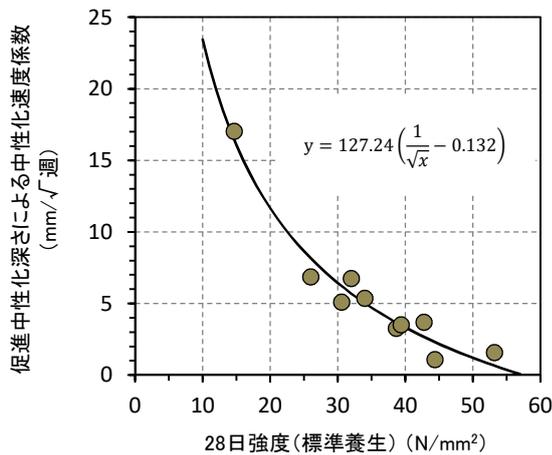


図-10 28日強度と促進中性化深さによる中性化速度係数の関係

### 5.3 指標値の検討

図-5 に示した透気係数  $K_T$  と、図-9 中の回帰式に、図-3 に示した各コンクリートの標準養生による試験体の材齢 28 日の圧縮強度を代入して求めた中性化速度係数  $A$  との関係を図-11 に示す。同図には、双方の関係を最小二乗法により求めた対数近似曲線を示しており、図中に示した決定係数より高い相関性があることが判る。この近似曲線をもとに、JASS 5 の計画供用期間の各級における耐久設計基準強度を定めるために信頼性設計手法<sup>9)</sup>に基づき算出された所要の中性化速度係数のうち、標準の級 (耐用年数 65 年) : 1.69 (mm/√年) に相当する透気係数  $K_T$  を求めた。同条件における透気係数  $K_T$  は  $2.49 (10^{-16} \text{m}^2)$  となり、この値を指標値の候補①とした。

次に、透気係数  $K_T$  と、図-10 中の回帰式に上記と同様に材齢 28 日の圧縮強度を代入して求めた促進中性化

速度係数  $A_a$  との関係を図-12 に示す。同図には、上記と同様に求めた対数近似曲線を示しており、図中に示した決定係数より高い相関性があることが判る。この近似曲線をもとに、JASS 5 の計画供用期間が標準の級のコンクリートにおいて、部材のかぶり厚さ 40mm の位置まで中性化が到達する場合の促進中性化速度係数 : 6.88 (mm/√週) に相当する透気係数  $K_T$  を求めた。同条件における透気係数  $K_T$  は  $1.39 (10^{-16} \text{m}^2)$  となり、この値を指標値の候補②とした。

本検討では、5.2 節に示した各条件により求めた中性化速度係数と実構造物に近い施工条件による実大試験体における透気係数との関係を近似した式をもとに、これら 2 つの指標値を求めた。各図について検討すれば、指標値より大きくなる範囲には、図-11 (候補①) では呼び強度 15 と 18 が、また、図-12 (候補②) では呼び強度 15~24 がプロットされている。コンクリートの一般的な

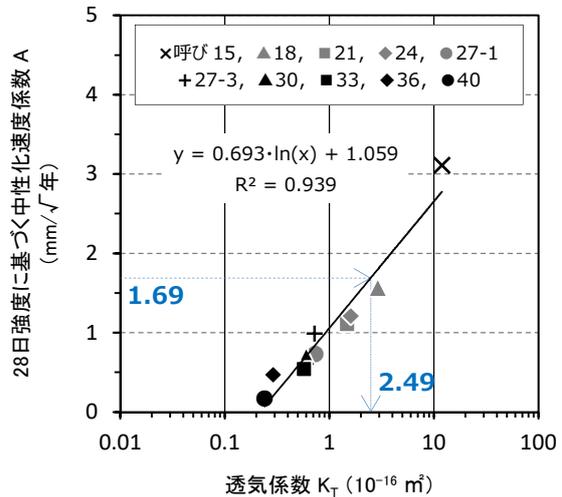


図-11 DC法の透気係数  $K_T$  と中性化速度係数  $A$  の関係

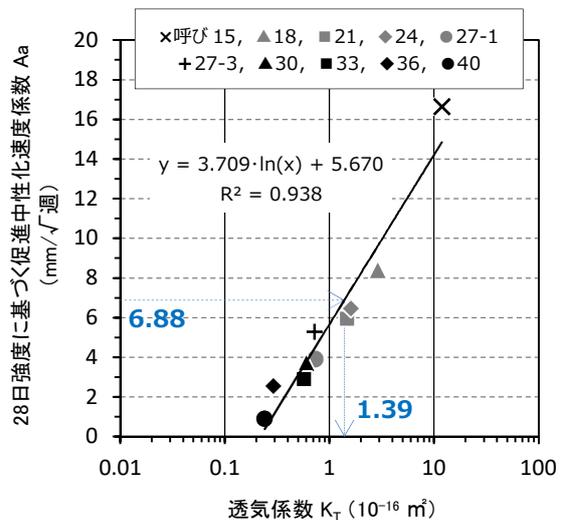


図-12 DC法の透気係数  $K_T$  と促進中性化速度係数  $A_a$  の関係

品質の考え方をもとに、4章に示した各試験結果を参照すれば、呼び強度 15 は低品質なものとなり、また呼び強度 18 は品質が劣るとは考えづらいが、DC 法による透気係数の変動係数 (40%程度) を考慮すれば、図-11 のような結果となることも考えられる。なお、図-12 の指標値は安全側の評価となるが、厳しい評価とも考えられる。

以上より、DC 法における透気係数  $K_T$  の指標値の一案として、図-11 より求めた  $2.49 (10^{-16} \text{m}^2)$  を小数点以下 1 桁に丸めた  $2.5 (10^{-16} \text{m}^2)$  を提案する。

## 6. おわりに

本論では、コンクリートの透気性と中性化抵抗性の関連に基づき、ダブルチャンバー法における透気係数  $K_T$  を評価するための指標値について検討した。本検討では、一連の実験データをもとに透気係数  $K_T$  と中性化速度係数との関係を求め、JASS 5 の計画供用期間の各級における耐久設計基準強度を定めるために算出された所要の中性化速度係数 (標準の級のものを) を参考値として、ダブルチャンバー法における透気係数  $K_T$  の指標値の一案とする  $2.5 (10^{-16} \text{m}^2)$  を求めた。

なお、本指標値は、限られた実験によるデータの範囲内において検討したものとなるため、実大試験体や実構造物におけるデータを蓄積して再考すること、ならびに実構造物において本指標値について検証することが必要となる。

また、本指標値は、試験体のコンクリート材齢が 3~6 ヶ月の時期に求めた透気係数  $K_T$  をもとに、建設時の評価指標として検討したものとなる。図-13 には、実験 II および実験 III でのコンクリート材齢が 3~6 ヶ月と、その後 3~4 年が経過した時点の透気係数  $K_T$  を示した。既往の研究<sup>例え 10)</sup>においても報告されているとおり、コンクリートの乾燥過程における表層含水状態の変化に伴い、透気係数が変動することは周知の事実である。同図では、試験体の経時に伴う明瞭な透気係数  $K_T$  の変動が示されている。このことから、コンクリートの含水状態の影響、

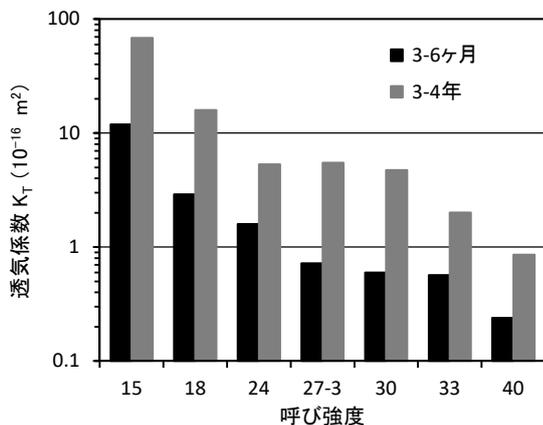


図-13 DC 法による透気係数  $K_T$  の経時変化

試験対象物の使用環境条件の違い等について考慮した評価指標についても、今後検討する必要がある。

## 謝辞

本論では、(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」において実施された共通試験の結果の一部を使用している。本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) R.J.Torrent : 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.
- 2) 半井健一郎, 蔵重勲, 岸利治 : かぶりコンクリートの透気性に関する竣工検査—スイスにおける指針—, コンクリート工学, Vol.49 No.3, pp.3-6, 2011.3
- 3) RILEM : Non-destructive evaluation of the penetrability and thickness of the concrete cover, RILEM report 40, State of the art report of RILEM TC189-NEC 'Non-destructive evaluation of the concrete cover', 2007.
- 4) RILEM TC116-PCD: Recommendations of TC 116-PCD, Tests for gas permeability of concrete. B. measurement of the gas permeability of concrete by the RILEM-CEMBUREAU method, Materials and Structures, Vol.32, pp.176-178, 1999.
- 5) Torrent, R. und Ebensperger, L.: Studie über methoden zur messung und beurteilung der kennwerte des überdeckungsbetons auf der baustelle – Teil 1, p.119, Office Fédéral des Routes, Suisse, Zürich, Januar.1993
- 6) 日本建築学会 : 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説, p.124, 2016.
- 7) 日本建築学会 : 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2018, pp.178-182, 2018.
- 8) 長谷川拓哉, 千歩修 : 文献調査に基づく屋外の中性化進行予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.665-670, 2006.
- 9) 和泉意登志, 嵩英雄, 押田文雄 : 鉄筋コンクリート造建築物におけるかぶり厚さの信頼性設計手法の提案—コンクリートの中性化によって鉄筋が腐食する場合—, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 384 号, pp.58-67, 1988.2
- 10) 蔵重勲, 廣永道彦 : Torrent 法透気試験により評価される表層透気係数に関する再考, 第 66 回セメント技術大会講演要旨 2012, pp.90-91, 2012.