

論文 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

田中 章夫*1・今本 啓一*2・下澤 和幸*3・山崎 順二*4

要旨：本研究では、鉄筋コンクリート建築物の表層透気性から中性化深さを予測すること目的として、既存鉄筋コンクリート建築物を対象とし、透気試験と中性化深さ測定を実施し、両者の関係を比較した。その結果、コンクリートの透気係数が大きくなるほど中性化が進行する傾向が認められた。しかし両者の相関は一意的ではなく、その建物の置かれる環境条件によって両者の関係が異なることも明らかとなった。このことから透気係数から中性化を評価する場合は、建物毎に検量線を設定することが望ましいと考える。また透気係数は約 $0.056 \mu\text{m}$ より大きい細孔によって支配されている可能性のあることが示唆された。

キーワード：ダブルチャンバー法, 既存建築物, 中性化速度係数, 透気係数, 細孔構造, 相対湿度

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐久性能は、一般に、鉄筋の腐食度合いで定義されるが、コンクリート内部に有害物質が無い限り、鉄筋を腐食せしめる因子は外部よりかぶり部分のコンクリートを通して浸入する。したがってコンクリートをより緻密化して、物質の透過性をより小さなものとする材料レベルの開発は自らその意義を持つ。しかし、複数の施工工程を経た RC 構造物において、材料の性能そのものが耐久であることは構造物の耐久性能を満足するための必要条件ではあるが十分条件とは成り得ない。打込み・締固めおよび養生などの複数の施工プロセスが構造物の耐久性能を大きく左右する RC 構造物の耐久性を原位置で評価することが重要である。かぶりコンクリートの、例えば透気性といった粗密の評価はこの意味で、鉄筋コンクリート構造物の直接的な耐久性評価につながるものであると考える。

建築物では一般に仕上材が用いられることが多いが、近年、この仕上材を美観の観点からだけでなく、中性化抑制といった耐久性向上の観点から評価できることが示されている¹⁾。仕上材が表層透気性に及ぼす影響は唐澤智之らにより検討され²⁾、またコンクリート自体の促進中性化深さと表層透気性の関係に位置づけられる。仕上材の中性化抵抗性の効果について検討されている³⁾。しかし、一般構造物は環境、仕上材の劣化、施工品質が中性化や透気性に影響すると考えられるため、試験体と対応するとは限らない。本研究は、原位置透気試験を既存構造物に適用するあたり、透気試験が測定している範囲、建築物及び経年コンクリートにおける透気性と中性化の調査結果を述べるものである。

2. 非破壊透気試験機

本研究では、写真-1に示す中性化と相関が良いとされるダブルチャンバー法透気試験機⁴⁾ (以下 DC 法)を用い、図-1に示す測定チャンバーによって透気試験を実施した。



写真-1 透気試験機

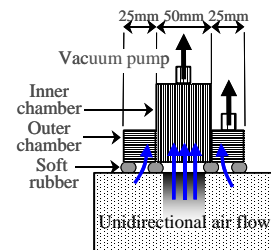


図-1 測定部チャンバー

3. 実験概要

3.1. 透気領域の検討

本研究で使用した透気試験においてコンクリートの表面からどの程度の深さまでの品質を評価しているのか検討した。

コンクリートの使用材料を表-1、計画調査を表-2に示す。図-2に示す様に外形3mm (内径2mm)の真鍮パイプをコンクリート表面から1cm間隔で5cmまで、パイプの先端は打ち込み面より20cmまで埋設し、圧力分布をDC法透気試験開始から60秒後の時点で測定した。

表-1 使用材料

使用材料	物性
水 (W)	上水道水
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm^3
細骨材 (S)	陸砂 表乾密度 2.57g/cm^3 , 吸水率 2.51%, 粗粒率 2.65
粗骨材 (G)	碎石 表乾密度 2.66g/cm^3

*1 (株) 八洋コンサルタント 修士(工学) (正会員)

*2 東京理科大学建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 (財) 日本建築総合試験所 材料部材料試験室 博士(工学) (正会員)

*4 (株) 浅沼組 大阪本店建築部 修士(工学) (正会員)

表-2 計画調合

W/C	s/a	単位量 [kg/m ³]			
		W	C	S	G
63	46.6	184	292	826	974

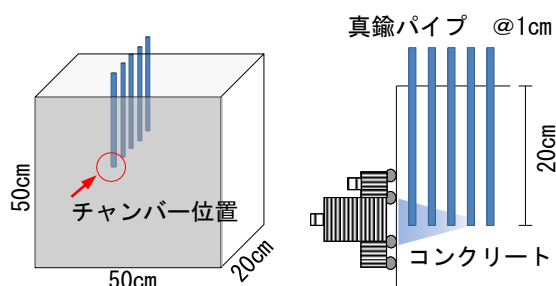


図-2 試験体詳細図

3.2. コンクリートの物性評価

3.2.1. 既存鉄筋コンクリート構造物及び経年コンクリート試験体の概要

表-3 に既存鉄筋コンクリート構造物及びコンクリート試験体の概要を示す。既存建築物の外観写真，測定位置および図面を図-3，4，5 に示す。コンクリート試験体

表-3 既存鉄筋コンクリート構造物及びコンクリート試験体概要

名称	記号	詳細	
		竣工年 (調査時材齢)	仕上げ
公営団地 K 住宅	HK	既存:1961年(49) 増築:1992年(18)	(外装)既存:モルタル下地, 吹付リシン仕上げ (外装)増築:モルタル下地, 吹付リシン仕上げ
東北大学 人類環境実験棟	TH	1979年(41)	(外装)打放し仕上げ
国立西洋美術館本館	NMWA	1959年(50)	(外装)打放し仕上げ
コンクリート試験体	AC	表-4 使用材料, 表-5 計画調合, 試験体形状(10×10×40 [cm ³])	

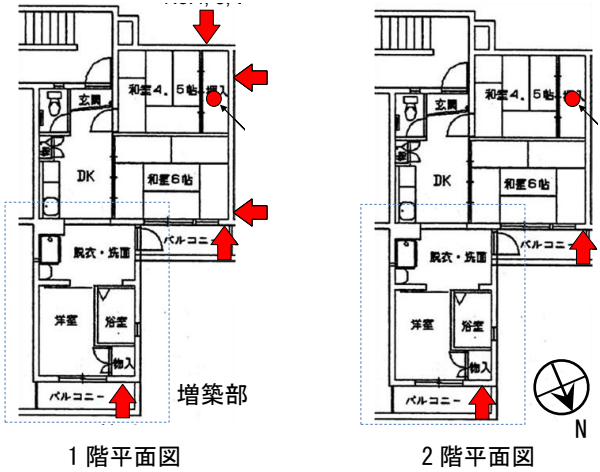
表-4 コンクリート試験体の使用材料と材齢

記号	材齢 [年]	使用材料		
		セメント(C)・混和材(C2)	細骨材(S)	粗骨材(G)
AC1	30	C1:普通ポルトランドセメント	鬼怒川, 密度 2.59g/cm ³	鬼怒川, 密度 2.57g/cm ³
AC2	31	"	鬼怒川, 密度 2.59g/cm ³	鬼怒川, 密度 2.57g/cm ³
AC3	19	"	鬼怒川, 密度 2.62g/cm ³	東京石灰工業, 密度 2.71g/cm ³
AC4	32	"	鬼怒川, 密度 2.62g/cm ³	転炉スラグ, 密度 3.37g/cm ³
AC5	20	C1:普通ポルトランドセメント C2:日立スラグ 10000cm ³ /g 密度 2.91g/cm ³	鬼怒川, 密度 2.62g/cm ³	鬼怒川, 密度 2.57g/cm ³
AC6	30	C1:普通ポルトランドセメント	S1:水砕スラグ, 密度 2.65g/cm ³ S2:海砂, 密度 2.72g/cm ³	鬼怒川, 密度 2.57g/cm ³
AC7	30	"	鬼怒川, 密度 2.59g/cm ³	鬼怒川, 密度 2.57g/cm ³
AC8	30	"	S1:水砕スラグ, 密度 2.62g/cm ³ S2:海砂, 密度 2.65g/cm ³	鬼怒川, 密度 2.71g/cm ³
AC9	12	"	鬼怒川, 密度 2.51g/cm ³	鬼怒川, 密度 2.55g/cm ³
AC10	28	"	S1:ニッケルスラグ, 密度 3.52g/cm ³ S2:鬼怒川, 密度 2.59g/cm ³	鬼怒川, 密度 2.59g/cm ³
AC11	31	"	鬼怒川, 密度 2.59g/cm ³	鬼怒川, 密度 2.57g/cm ³

(AC) の使用材料を表-4, 計画調合を表-5 に示す。

表-5 コンクリート試験体の計画調合

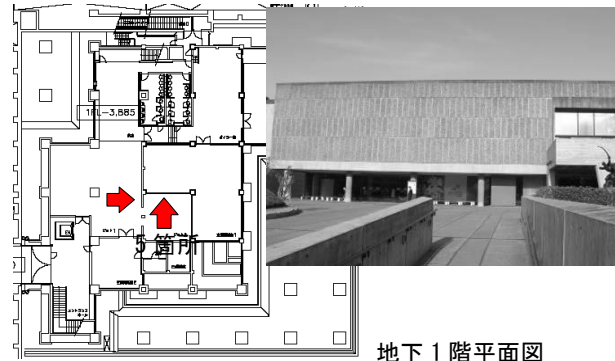
記号	W/C	単位容積質量 [kg/m ³]					
		W	C1	C2	S1	S2	G
AC1	60	181	301	-	694	-	1145
AC2	60	178	297	-	736	-	1038
AC3	60	167	278	-	972	-	906
AC4	65	205	315	-	852	-	1216
AC5	55	165	210	90	768	-	1041
AC6	70	178	254	-	625	196	1029
AC7	70	179	256	-	769	-	1112
AC8	50	167	278	-	291	681	906
AC9	62	173	279	-	861	-	908
AC10	50	176	347	-	285	388	1176
AC11	60	179	297	-	717	-	1054



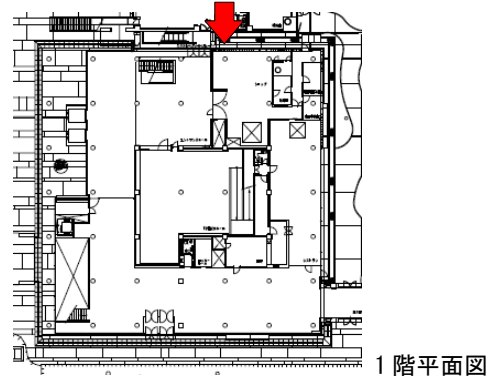
1階平面図

2階平面図

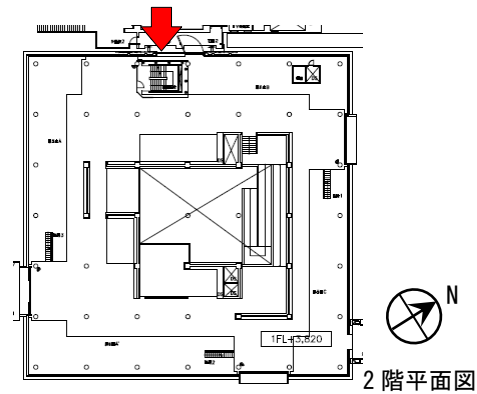
図-3 公営団地 K 住宅 (TK)



地下1階平面図



1階平面図



2階平面図

図-5 国立西洋美術館本館 (NMWA)

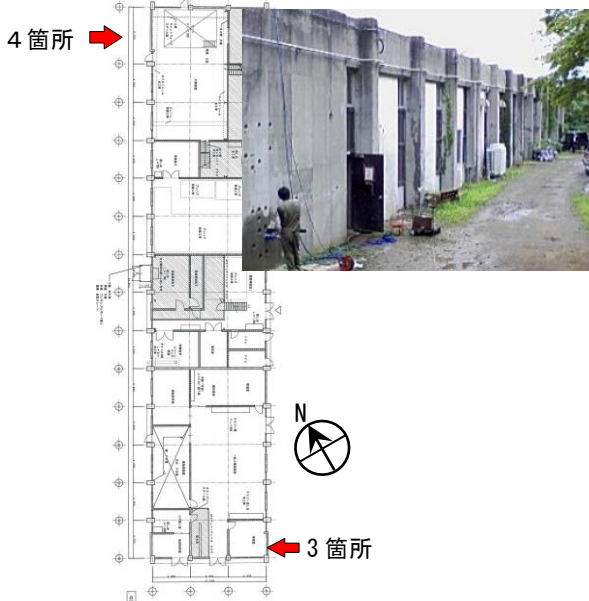


図-4 東北大学人類環境実験棟 (TH)

3.2.2. 試験項目

(1) 中性化深さ測定

既存鉄筋コンクリート構造物では透気試験実施箇所と同一箇所において、コア抜き試験を行い、仕上材を除いたコンクリート部のみの中性化深さを測定した。また、試験体記号 AC では、試験体割裂後、4面からの中性化深さを測定した。

(2) コンクリートの細孔径分布

透気試験が実施されたコンクリート試験体の中性化部より採取した試料を鉄乳鉢で粗粉砕した。粉砕した試料から粗骨材を取り除いたモルタル部を網ふるいでふるい分け、5~2.5 mmに粒度調整をした。

粒度を調整したモルタル試料は-48℃真空凍結乾燥装置で14日間の乾燥を行った後に試料を約3gに精秤し、水銀圧入式ポロシメータを用いて細孔分布測定を行い、空隙構造を評価した。

3.2.3. 中性化深さの分析方法

建築では一般的に仕上材を施すことが多く、下地材及び仕上材による中性化低減効果が報告されている⁵⁾。

既存構造物においては中性化深さを透気係数から非破壊で予測する場合、仕上げの劣化具合やモルタル下地の厚さなどを正確にとらえることは難しく。また、DC

法では仕上げを含めた透気性を評価しているため、同一コンクリート単体の透気性を評価しない限り仕上材の透気性とコンクリートの透気性を分離することはできないと考えられることから、本研究では、室内外の二酸化炭素濃度の影響を排除するために、二酸化炭素濃度を考慮した式(1)を使用して室内側を屋外側に補正し中性化速度係数を求めた。

$$C = A \cdot \sqrt{\frac{CO_2(\text{屋内})}{CO_2(\text{屋外})}} \cdot \sqrt{t} \quad \dots \text{式(1)}$$

ここで、

C: 中性化深さ [mm]

A: 中性化速度係数 [mm/year^{0.5}]

CO₂(屋内): 測定データがない場合は 2000 [ppm]

CO₂(屋外): 500 [ppm]

t: 材齢 [year]

4. 結果および考察

4.1. DC 法によるコンクリートの透気領域

コンクリート内部の圧力分布結果を図-6 に示す。この結果より、DC 法による透気試験は非線形ながら表面より 30~40 mm 程度までのかぶりコンクリートの品質を概ね評価している。このことから、DC 法による透気性試験は実構造物にも適用できると考えられる。なお、この時演算処理によって求まる透気深さは 100 mm であり、測定された圧力とは対応しないことが認められた。

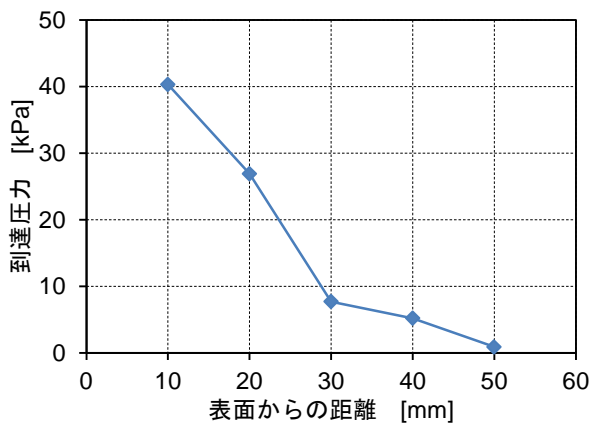


図-6 透気試験時のコンクリート内部の圧力分布

4.2. コンクリートの透気係数と中性化速度係数

図-7、図-8、図-9 にそれぞれの建築物における透気係数と中性化速度係数の関係を、図-10 に屋内暴露したコンクリート供試体 (10×10×40cm) の透気係数と中性化速度係数を示す。

図-7 の HK では、透気係数が大きくなるほど中性化速

度係数も大きくなる点で仕上材料の有無に関わらず傾向が認められるが、仕上材の有無を一括して評価した相関係数は低い。仕上材の劣化程度が影響していると考えられるが、詳細は現時点では不明である。同一建物において、透気係数が同程度であっても仕上材の有無ごとに評価することによって透気係数から中性化の進行をより精度よく推定することが可能になるとと思われる。

図-8 の NMWA では、透気係数 0.1 以上の範囲において屋内の実測 CO₂濃度を補正することによって透気係数と中性化速度係数に高い相関が見られた。

図-9 の TH では、方位による透気係数と中性化速度係数の関係は認められない。また、同じ透気係数であっても、中性化速度係数が倍近く異なることが認められた。今後、この点が耐久性評価上問題になることが挙げられるため、原因を探究しなければならない。

図-10 の同じ室内環境下で長期暴露されたコンクリート試験体を対象とした AC では、異なる使用材料・計画調査及び異なる打設時期であっても透気係数と中性化速度係数に高い相関が認められた。

図-11 に本研究で調査した全てのコンクリートの透気係数と中性化速度係数の関係を示す。透気係数が大きいほど中性化速度係数も大きなバラツキを持って大きくなる傾向にある。両者の相関は一意的ではなく、その建物の置かれる環境条件によって両者の関係が異なることが明らかである。このことから透気係数から中性化をより高い精度で評価することを指向する場合は、建物毎に個別の透気係数 - 中性化検量式を作成することが有効と考えられる。

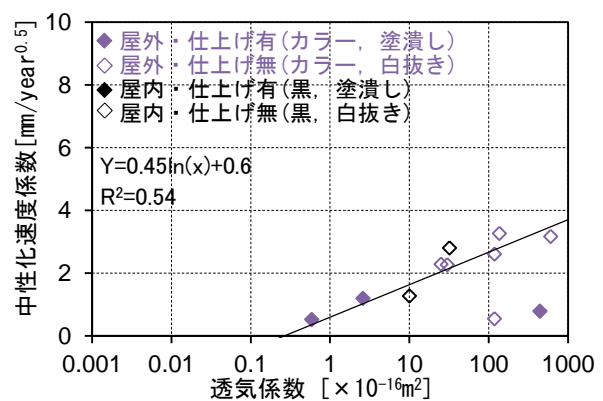


図-7 HK における透気係数と中性化速度係数

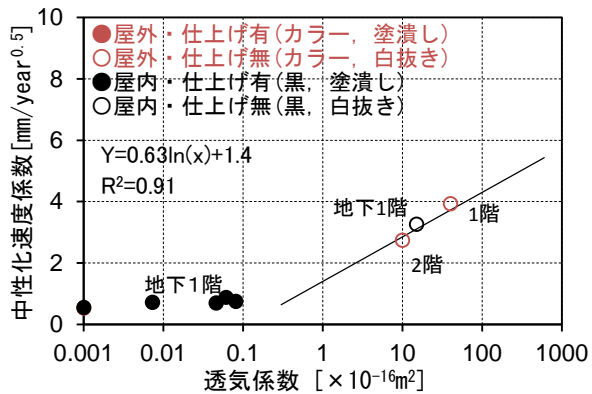


図-8 NMWAにおける透気係数と中性化速度係数

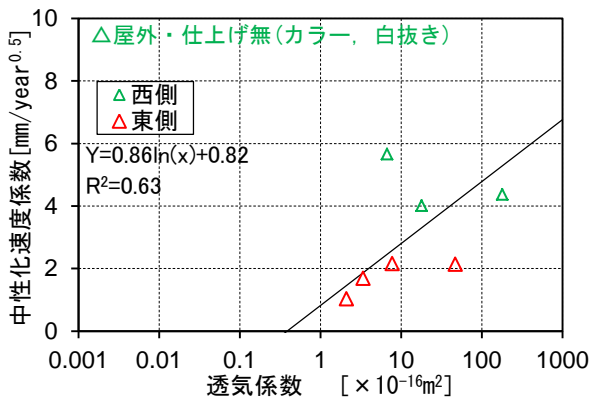


図-9 THにおける透気係数と中性化速度係数

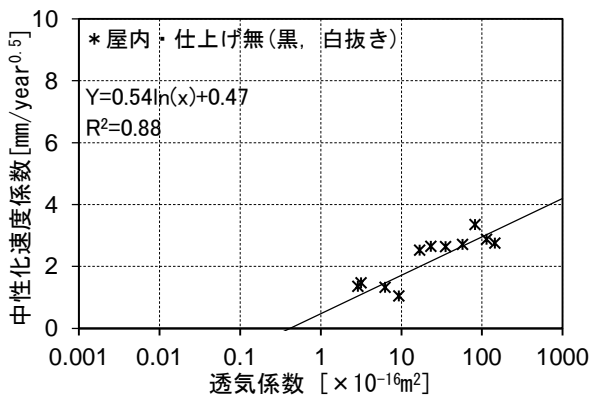


図-10 ACにおける透気係数と中性化速度係数

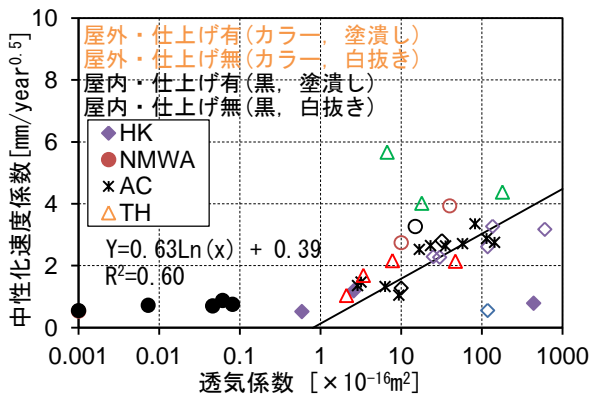


図-11 透気係数と中性化速度係数

5.3. 細孔構造と透気係数

図-12 の透気係数と中性化速度係数に示された両者に相関がある AC1, AC2, AC5, AC7, および相関のない AC10 において細孔構造解析を行った。

細孔径分布と細孔量の結果を図-13 に示す。高炉スラグ微粉末が含まれている A5 も関係なく全体的な細孔径分布の傾向に大きな違いが認められない。

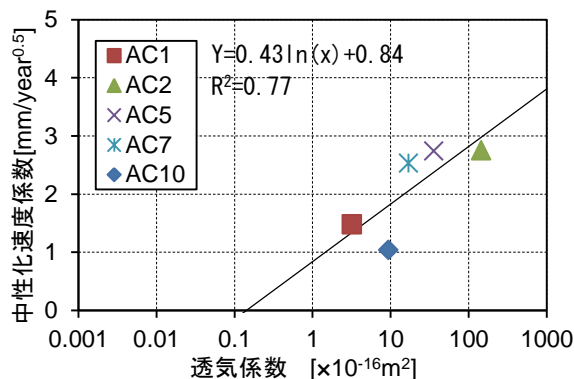


図-12 細孔構造解析を行った試験片のデータ

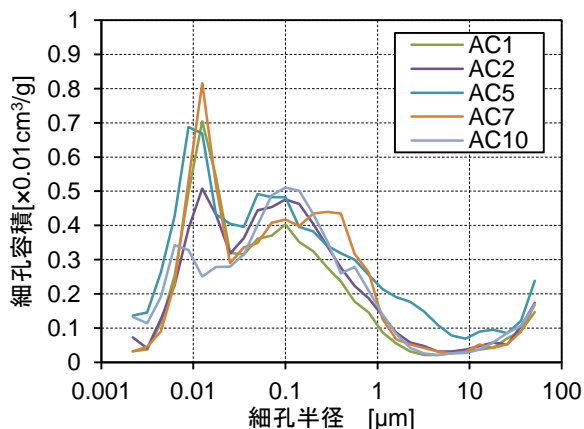


図-13 細孔径分布

また、湯浅らの論文¹⁰⁾によると、細孔構造の経時変化は材齢 28 日以降では細孔径 0.056 μm 以上の大きい細孔はほとんど変化しないと報告されている。これを基に透気係数と細孔径 0.056 μm 以上の総細孔容積の相関を図-14 に示す。

M.Rommer⁷⁾によれば、相対湿度 35%, 70%, 90% 環境下にコンクリートを置かれた状態で DC 法による透気係数の経年変化を測定した結果、相対湿度 35% では材齢と共にコンクリートの乾燥が進むことによって透気係数が大きくなっており、一方、相対湿度が 70% 及び 90% では透気係数の経年変化は認められないことが報告されている。このことから、コンクリート内部の含水状態が透気係数に影響していると考えられる。材齢 36 年における鉄筋コンクリート構造物のコンクリート内部湿

度状態を測定した鶴木ら⁸⁾によると外壁表面では相対湿度 67.8%，外壁表面から内部 1cm の相対湿度は平均 76.5%，最大 97.4%であることが報告されている。また、長尾ら⁹⁾ではコンクリート壁では躯体内部に進むにつれ含水率が高くなっていることを報告しており。このことから、相対湿度も同様にコンクリート内部に進むことによって上昇すると考えられる。

本研究で使用した水銀圧入法から求めた細孔径分布とケルビンの毛細管凝縮理論から求まる相対湿度と細孔径が 1 対 1 の関係があることを前提とすると、コンクリート内部の相対湿度平均 76%と最大 97.4%から求まる細孔半径は約 0.0042 μm～約 0.055 μm とされ、幅はあるものの概ねこの値の半径 0.0042～0.055 μm 以下の細孔は水で満たされると考えられる。

以上のことから、コンクリートの細孔構造の経時変化は 0.056 μm 以上の細孔では変化せず、またコンクリート内部の相対湿度も高いことから約 0.0042～0.055 μm 以下の細孔は液滴として満たされているため、透気係数の経年変化は見られないと考えられる。測定された透気係数と細孔構造では異なる水分状態であるため矛盾を認められる。透気係数と総細孔容積の相関を考慮すれば、透気係数は主に液滴として満たされている約 0.056 μm より大きい細孔を測定していることが推測できる。この点については今後さらに検討を進めてゆきたい。

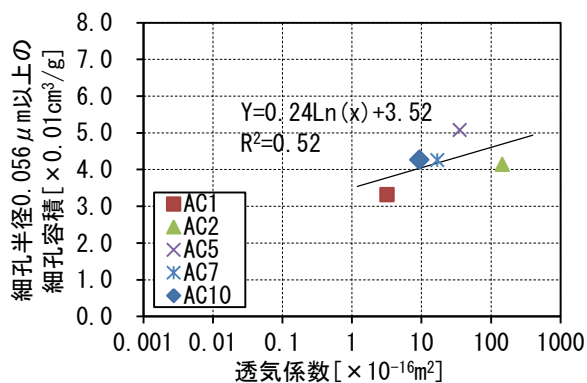


図-14 透気係数と細孔容積

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) ダブルチャンバー法透気試験機では、概ねかぶりコンクリートの品質 30～40 mm を評価している。
- (2) 透気係数が大きくなるほど中性化速度係数は大きくなる傾向が全ての建物・試験体において認められた。
- (3) 透気係数から中性化速度係数をより高い精度で評価

することを指向する場合は、透気係数 - 中性化検量式を作成することが有効と考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、足利工業大学 横室隆先生、東北大学 西脇智哉先生、東京理科大学 兼松学先生のご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：コンクリート工事標準仕様書 JASS5, 2009.
- 2) 唐沢智之ほか：躯体コンクリートの中性化抑制に寄与する各種仕上材の評価 その 10 仕上塗材の中性化抑制効果と透気性に関する考察，日本建築学会学術講演梗概集 A-1, pp.959-960, 2008.
- 3) 田中章夫，今本啓一，唐沢智之，山崎順二：鉄筋コンクリート造建築物の表層透気性を評価する上での 2, 3 の課題に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.1, pp.1755-1780, 2010
- 4) Torrent, R.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials & Structures, v25, n.150, pp.358-365, July 1992.
- 5) 杉山央，榎田佳寛，阿部道彦，安田正雪：高強度コンクリートを用いた実大柱部材の材齢 15 年における強度性状および中性化，日本建築学会構造系論文集，No.631, pp.1459-1466, 2008.09
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針（案）同解説，2006
- 7) M. Rommer.: Effect of moisture and concrete composition on the Torrent permeability measurement, Materials and structures, v38, pp.541-547, June 2005.
- 8) 鶴木圭一，兼松学：局所的な内部温・湿度状態がコンクリート構造物に及ぼす影響に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.968-972, 2009
- 9) 長尾覚博，中根淳：コンクリート構造体の含水率およびひずみ測定結果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.1, pp.585-590, 1994
- 10) 湯浅昇，笠井芳夫，松井勇：乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率，細孔構造の不均質性，日本建築学会構造系論文集，No.509, pp.9-16, 1998