

論文 既存構造物の表層透気と中性化に関する実地調査

山田雄大*1・瀬古繁喜*2・寺西浩司*3・清原千鶴*4

要旨：本研究では、鉄筋コンクリート構造物の中性化に及ぼす表層透気、局所的な環境条件の影響およびコンクリートの圧縮強度と透気係数、質量含水率の関係を把握することを目的として、既存鉄筋コンクリート建築物を対象とした調査を実施した。その結果、既存構造物において透気係数と中性化には一意的な相関が認められた。また採取したコアから中性化深さを測定したところ、方位や屋内外などコンクリートが存置される局所的な環境によってその大きさが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：実構造, 比抵抗, 中性化深さ, 透気性能, 含水率

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の長期供用が望まれており、これらの構造物の耐久性を適切に評価し、維持管理することが重要と言える。一般に既存構造物の耐久性は鉄筋の腐食度合いで定義されるが、コンクリート内に鉄筋を腐食せしめる因子がない限り、その因子は外部からかぶりコンクリートを通過し鉄筋に到達することになる。したがって、かぶりコンクリートの透気性は構造物の耐久性を評価する上で重要な意味を持つと考える。

一方、既存コンクリートの健全度を評価する指標の1つとしてコア採取により中性化深さの測定を行い、中性化の進行の予測が行われている。しかしながら、中性化はその部位によって大きくばらつきことが指摘されてお

り、多数のコアを採取し健全度を評価することは構造物の損傷を助長させることになる。そのため、田中ら¹⁾によって非破壊試験によって中性化の進行を評価するために原位置透気試験により得られる透気係数と中性化試験の関係について検討が行われており、透気係数が大きくなると中性化速度係数が大きくなる傾向があるが、構造物が置かれる環境条件によって両者の関係が異なることが指摘されている。そのため、既存構造物の健全度を非破壊試験である透気試験を用いて評価する方法を確立するためには、様々な環境条件での既存構造物の原位置表層透気係数と中性化の関係に関するデータを蓄積することは重要であると考えられる。

そこで、本研究は既存構造物に関して構造物が存置し

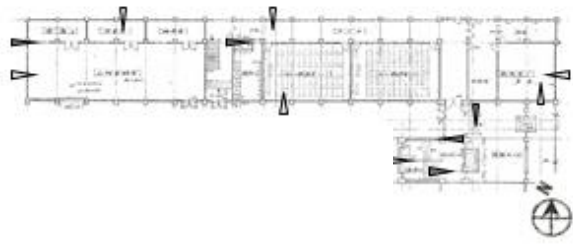

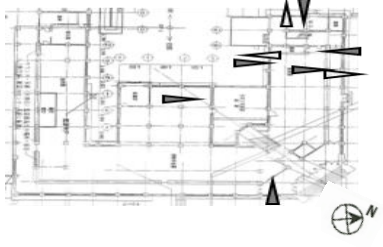

記号	平面図	外観写真
AI		
IC		

図-1 建物外観および測定箇所平面図

*1 東京理科大学 工学研究科建築学専攻 修士課程 (学生会員)
 *2 愛知工業大学 工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)
 *3 名城大学 理工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)
 *4 東京理科大学 工学部建築学科嘱託補手 博士(工学) (正会員)

ている環境条件による影響を調査すると共に、表層透気係数と中性化の関係把握を目的に、鉄筋腐食の因子である透気性、中性化性状、躯体コンクリートの圧縮強度、および含水率について検討を行った。

2. 調査概要

2.1 調査対象

表-1 に本研究対象である2棟(愛知工業大学(AI)、旧一宮市役所(IC))の調査構造物概要を示す。建物外観および測定箇所平面図を図-1 に示す。図-1 中に示す矢印箇所において各調査を実施した。

2.2 調査項目および試験方法

(1)圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 (コンクリート圧縮強度試験方法) に準拠しコア長さがその直径に満たないものは JIS A 1107 (コンクリートからのコア採取方法および圧縮強度試験方法) を参考に補正を行った。

(2)表層透気試験

図-2 にダブルチャンバー法の概要 (DC 法) を示す。ダブルチャンバー法はハーゲン・ポアイズユ則 (式 (1)) によって透気性を評価する装置である。測定中、外部チャンバーが内部チャンバーの圧力変化に追随するため、外部チャンバーからの外気の漏れを遮断し、測定点のみ透気性を評価できるのが特徴である。

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

ここに、

- K_t : 透気係数 [$\times 10^{-16} \text{m}^2$]
- V_c : 内部チャンバーの体積 [m^3]
- A : 内部チャンバーの断面積 [m^2]
- μ : 空気の粘性 [Ns/m^2]
- ε : 空隙率 (0.15) -
- P_a : 外気圧 [N/m^2]
- ΔP : $t_0 \sim t_f$ 間の圧力増分 [N/m^2]
- t_f : 計測の終了時間 [s]
- t_0 : 計測開始時間 (60 秒) [s]

(3)中性化深さ試験

透気試験実施箇所と同一箇所において、 $\phi 80\text{mm}$ 程度のコアを採取し、JIS A 1152 に準じフェノールフタレイン液を噴霧して中性化深さを測定した。仕上げ材を有するコアは仕上げ材を除いたコンクリート部の中性化深さを測定した。中性化速度係数の算出には以下の式(2)を用いた。

$$C = A\sqrt{t} \quad (2)$$

表-1 各調査対象詳細

記号	AI	IC
用途	校舎	市役所
竣工年 (調査時材齢)	1968年 (47年)	1930年 (84年)
階数	地上6階	地上2階
仕上げ	打ち放し仕上げ (一部塗装+モルタル)	仕上げ有り
所在地	愛知	愛知

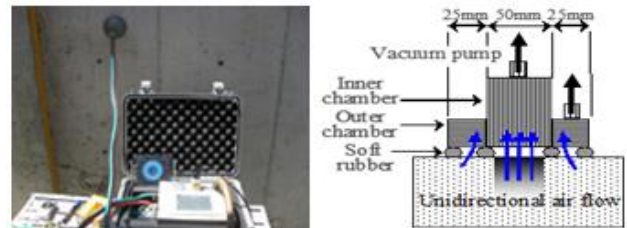


図-2 ダブルチャンバー法の概要(DC法)



図-3 Wenner 法概要

ここに、

- C : 中性化深さ [mm]
- A : 中性化速度係数 [$\text{mm}/\text{years}^{0.5}$]
- t : 調査時築年数 [years]

なお、室内外で二酸化炭素濃度が異なり、これは中性化速度係数には影響するものの透気係数には影響しないため式(3)を用いて室内環境を屋外環境に補正を行い中性化速度係数を求めた。

$$C = A \cdot \sqrt{\frac{\text{CO}_2(\text{屋内})}{\text{CO}_2(\text{屋外})} \cdot t} \quad (3)$$

ここに、

- $\text{CO}_2(\text{屋内})$: AI・IC : 890[ppm]
- $\text{CO}_2(\text{屋外})$: AI・IC : 410[ppm]

(4)比抵抗

図-3 に Wenner 法の概要を示す。図-3 に示すように電流電極 A, B および電位電極 C, D を設置し、A と B 間に電流 I を流した時の C と D 間の電位差 V を測り以下

の式(4)より電気抵抗率を求める。

$$\rho = 2 \pi a \times \frac{V}{I} \quad (4)$$

ここに、

- ρ : 比抵抗[kΩ・cm]
- V : 電圧[V]
- I : 電流[I]
- a : 胴体長さ[cm]

(5)質量含水率試験

仕上げ材表面からの深さ方向の含水率分布を測定するため、ドライビットにてコアを採取した。採取したコアは 15～20mm 毎に切断し、105℃乾燥炉により乾燥状態とし、式(5)を用いて含水率を算出した。

$$m = \frac{M - M_{dry}}{M_{dry}} \times 100 \quad (5)$$

ここに、

- m: 質量含水率(%)
- M: 調査時質量(g)
- M_{dry} : 105℃乾燥後絶燥質量(g)

3. 調査結果および考察

3.1 圧縮強度

図-2 に圧縮強度の度数分布を、表-2 に平均圧縮強度および変動係数を示す。図-1 より、建物 AI は 20～30N/mm² に集中しているのに対し、建物 IC では高範囲に分布しており、圧縮強度のばらつきが大きいことが分る。また、設計時に想定されるコンクリート強度の変動率は 10%を目安とされているが、表-2 によるとコア強度の変動率は建物 AI では 12～17%、建物 IC では 33%であり、いずれも想定よりも高い値となっている。実構造物の躯体強度は想定よりもばらつきが大きく、建設年代が古いほどばらつきが大きくなることが確認できた。

また、建物 AI においては、3階（屋内からコア採取）よりも1階（屋外からコア採取）の平均圧縮強度が高くなっており、この要因として設計基準強度の差異、また屋内に比べ屋外環境下は降雨・湿度の影響を受けやすく湿潤養生の様な環境が発現したことが考えられる。

3.2 中性化深さ

図-3 に建物 AI における各部材の中性化深さの結果を示す。屋外の壁においては北面、東面が中性化の進行が早く、西面および南面は遅い結果となった。屋内においては柱 1 の中性化深さが若干小さいが、打ち放しであれば部材によらずほぼ同一の値と示している。一方、既往の研究²⁾と同様に仕上げ材が施されていると中性化がほとんど進行していない。

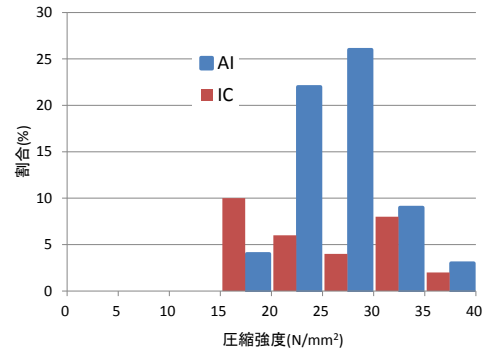


図-2 圧縮強度の度数分布

表-2 圧縮強度試験結果

	AI			IC
	全体	1階(屋外)	3階(屋内)	
測定点	58	6	52	28
平均強度 (N/mm ²)	27.6	29.9	25.4	19.8
標準偏差 (N/mm ²)	3.8	3.5	4.2	6.6
変動係数	0.14	0.12	0.17	0.33

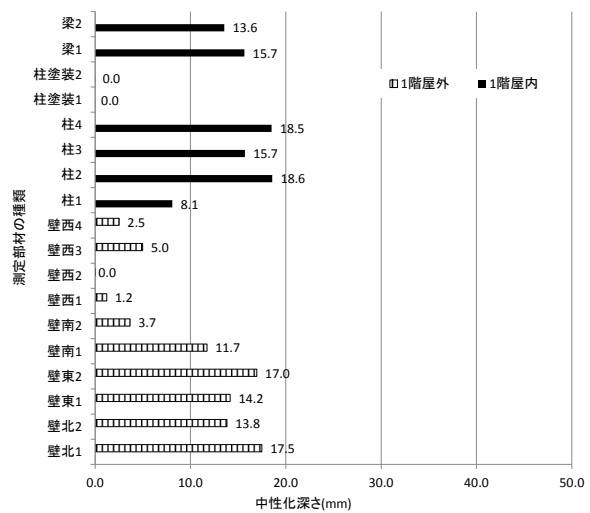


図-3 建物 AI の部材ごとの透気試験結果

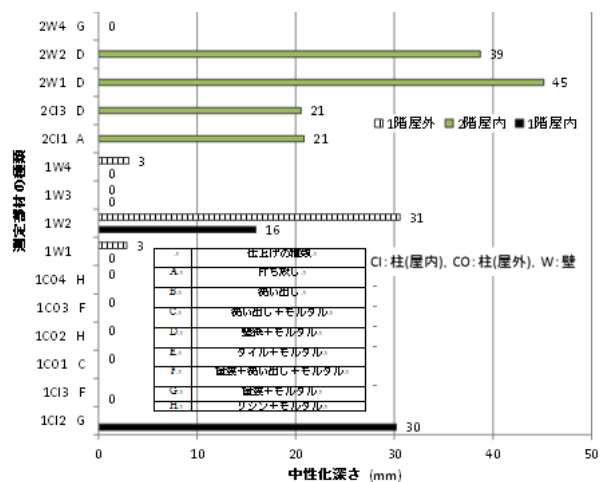


図-4 建物 IC の部材ごとの中性化深さ

図-4に建物ICにおける各部材の中性化深さの結果を示す。測定箇所でも中性化が進行していたのは2階壁室内壁(2W1)であった。1階においては屋内屋外に関わらず中性化深さが進行していない箇所が多く見られており、一般的なかぶり厚さが40mmであると仮定すると中性化が鉄筋位置までに到達している箇所は少ないと考えられる。また、2階の室内壁(2W1, 2W2)の中性化の進行は1階(1W2)の10倍程度であった。2階室内柱(2CII)以外は仕上げが施されていたため、この要因として、仕上げ層の厚さや仕上げ層および躯体コンクリートの緻密さが影響を及ぼしているものと考えられる。

図-5に建物AIの圧縮強度と式(3)より得られた中性化速度係数と圧縮強度の関係を示す。図中にはJASS5における圧縮強度と中性化の関係を示す近似式(6)との関係を示す。

$$A=23.8(1/\sqrt{f_c}-0.13) \quad (6)$$

ここに、

A: 中性化速度係数(mm/年^{0.5})

f: 圧縮強度(N/mm²)

日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計指針」³⁾においては、中性化深さの変動係数は10%とされているが、本調査の結果では建物全体の中性化深さの変動係数が60%と高く、既存構造物における変動係数は想定されている値が妥当でない可能性が考えられる。また、一般に打ち放しコンクリートの圧縮強度と中性化に相関があるとされるが本調査の範囲内では、その相関は確認できなかった。なお、既存構造物において圧縮強度にばらつきが生じることは広く知られており、今後は、既存構造物の圧縮強度と中性化速度係数の関係を知るために適切なコア採取本数を把握することが重要であると考えられる。

3.3 透気係数

図-6に建物AIにおける透気係数と中性化速度係数の関係を示す。これによると、透気係数 $0.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下の領域では中性化の進行は確認できなかった。透気係数 $0.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以上では、西面打ち放し部の測定結果を除けば、透気係数が高いと中性化速度係数も大きくなる傾向を示した。なお、西面打ち放し部において透気係数が高いにもかかわらず中性化速度係数が小さな値を示しているが、これは測定位置に微細なひび割れが生じていたため⁴⁾に大きい値を示したと可能性が考えられる。

屋内塗装箇所の測定点では2点共に透気係数が小さく、屋内打ち放し部の透気係数と比較しても非常に小さい。これは、仕上げ層の緻密さが透気係数に影響を及ぼしていることが確認できる。

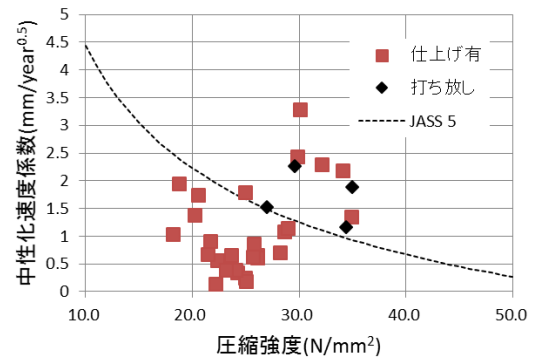


図-5 圧縮強度と中性化速度係数の関係(建物AI)

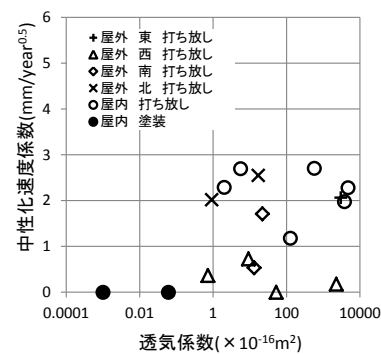


図-6 建物AIにおける透気係数と中性化速度係数

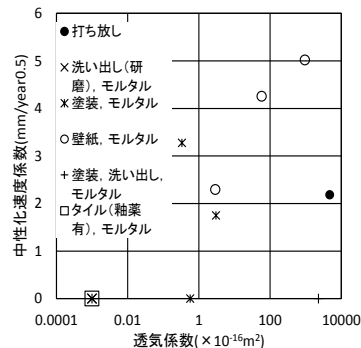


図-7 建物ICにおける透気係数と中性化速度係数

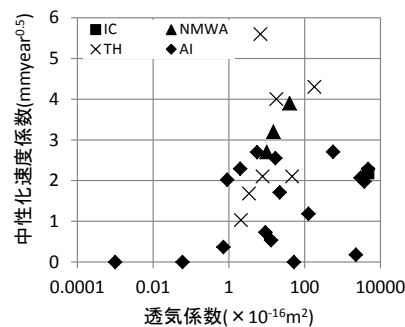


図-8 透気係数と中性化速度係数

図-7に建物 ICにおける透気係数と中性化速度係数の関係を示す。図-6と同様に仕上材が施されている場合においても透気係数が大きくなるに伴い中性化速度係数も大きくなる傾向を示した。また、各仕上げ材によって透気係数が異なり、洗い出し仕上げに高い中性化抑制効果があることを示した。なお、透気係数が小さいにもかかわらず中性化速度係数が $3\text{mm/year}^{0.5}$ 超える箇所が確認できた。

図-8に既往の研究で得られた透気係数と中性化速度係数を示す。これによると既存構造物が存置している環境の違いによらず透気係数 $1.0 \times 10^{-16}\text{m}^2$ 以下であれば、中性化がほとんど進行していないことが分る。一方で、透気係数が小さい領域では、ばらつきは少ないが、透気係数が大きくなるとそれに伴いばらつきも大きくなる傾向を示した。このことから、透気係数と中性化速度係数との間には相関が確認できるが構造物が存置している環境(温湿度の差異)に影響されることが確認できる。

よって次項にて、局所的な環境条件が構造物に与える影響について述べる。

3.4 中性化速度係数と質量含水率

図-9に建物 AI, IC の中性化速度係数と表層から40mmにおける質量含水率の関係を示す。これによると、建物の違い、仕上げ材の有無によらず、質量含水率が高くなると中性化速度係数が小さくなる傾向が見られる。既往の研究⁵⁾では含水率が高いと中性化が進行しないことが示されているが、本調査対象である AI, IC も共に、同様な結果が得られた。

建物 AI における屋内外の違いについてみると、質量含水率が同一でも屋内の中性化速度係数が大きい結果となった。本調査の範囲内では質量含水率が4%以上であれば、中性化速度係数の値が、比較的中性化の進行が緩やかであるとされている $2\text{mm/year}^{0.5}$ を下回っている。既往の研究⁶⁾では質量含水率が4%を超える領域においても RC 構造物の鉄筋の腐食グードが軽微なことが示されており、この要因の1つとして質量含水率4%以上であれば中性化の進行が緩やかであることが考えられる

3.5 中性化速度係数と比抵抗

図-10に建物 AI における比抵抗と中性化速度係数の関係を示す。四電極法による比抵抗は図-3に示すように、CおよびD間の midpoint 直下の電極感覚に相当する点が測定点となり、コンクリートを対象とした測定では、測定点周辺における骨材の大きさなどコンクリートの構成材料の影響を含んだコンクリート表層の見かけの比抵抗が得られている。また、一般に水は電気を通しやすい性質を持つことから、水分が多いほど電気抵抗率は低くなる傾向を示す。これによると建物 AI においては、比抵抗が大きいほど中性化速度係数が大きくなる傾向が見られる。また、屋内の

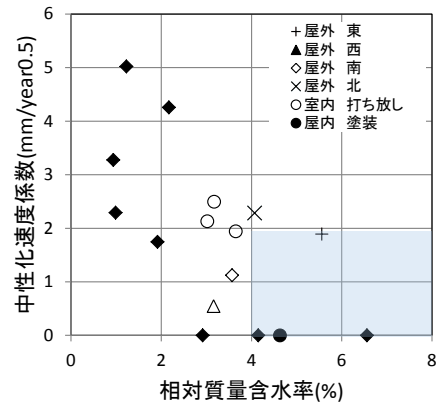


図-9 質量含水率と中性化速度係数の関係

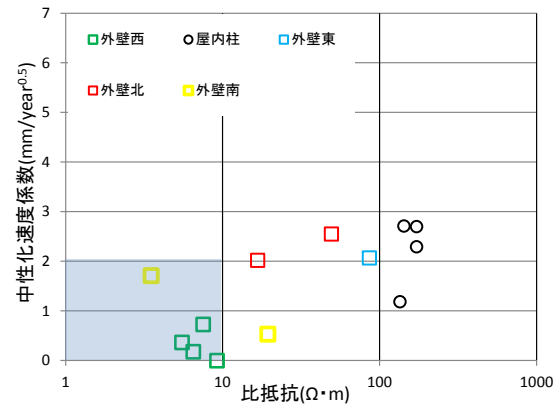


図-10 比抵抗と中性化速度係数の関係

方が屋外に比べて比抵抗が大きく、降雨・湿度の影響を受けない室内の安定した環境に存置していたためにコンクリート表層の水分が少なくなったためと思われる。本調査結果では、比抵抗 $10\Omega \cdot \text{m}$ 以下であれば、中性化速度係数が $2.0\text{mm/year}^{0.5}$ を下回る結果となった。

3.6 透気係数と比抵抗

これまでの検討結果より、透気係数が $1 \times 10^{-16}\text{m}^2$ 以下であればコンクリートが緻密なため中性化の進行が緩やかであることならびに質量含水率が4%以上および比抵抗が $10\Omega \cdot \text{m}$ 以下であれば中性化の進行が緩やかであることが示唆された。

そこで、透気係数と比抵抗および透気係数と質量含水率にこれらの閾値を組み合わせ、その結果を図-11および図-12に示す。図-11では、図中のハッチ箇所である透気係数 $1 \times 10^{-16}\text{m}^2$ 以下および比抵抗 $10\Omega \cdot \text{m}$ 以下の範囲にあれば、中性化の進行が緩やかな領域とみなせる。これによると、図-6において、西面打ち放し部において透気係数が高いにもかかわらず中性化速度係数が小さな値を示している箇所は、コンクリートの含水率が高いことが要因の1つであると考えられる。一方で、コンクリート中の含水率が高い(比抵抗が低い)と鉄筋腐食発生

による腐食電流を流れやすくする要因ともなる。下澤らの研究⁸⁾によれば、比抵抗が $100 \Omega \cdot m$ を上回った場合、透気性への含水状態の影響が少なくなり、鉄筋腐食抵抗性を評価する指標の1つとなりうるが示されている。本調査範囲では鉄筋腐食は確認できなかったが、今後は、比抵抗と鉄筋腐食状況についても既存構造物においてデータを収集することによって、透気試験や比抵抗試験などの非破壊試験結果を組み合わせることによって、打ち放し部における鉄筋腐食危険領域などが検討できる可能性があると思われる。

図-12 では、図中のハッチ箇所である透気係数 1×10^{-16} 以下および質量含水率 4%以上の範囲にあれば、中性化の進行が緩やかな領域とみなせる

4. まとめ

本研究は既存構造物に関して構造物が存置している環境条件による影響を調査し、鉄筋腐食の因子である透気性、中性化性状、躯体コンクリートの圧縮強度、および含水率について検討を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 対数軸上において透気係数 0.1×10^{-16} 以下の領域では中性化の進行は確認できなかった。このことから透気係数 0.1×10^{-16} 以下の領域においては中性化が進行しないと理解してよいと考える。
- 2) 透気係数と中性化速度係数に概ね対数軸上の直線関係が確認できるが、方位による局所的な環境条件に影響を受ける。
- 3) 質量含水率が高いと中性化速度係数が小さい事が確認できる。このことから含水率が高い環境下において中性化が進行しないことが考えられる。
- 4) 本研究の範囲内で質量含水率が 4%を超えるおよび比抵抗 $10 \Omega \cdot m$ を下回る領域において中性化の進行を抑制していることを確認した。

謝辞

本研究は、日本建築学会・既存鉄筋コンクリート造建築物の構造・材料調査WG(主査：野口貴文(東京大学))の活動の一環として行われたものである。ここに記して深謝の意を表す

参考文献

- 1) 田中章, 今本啓一: 表層透気性による既存 RC 構造物の中性化予測に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 69 号, pp.1539-1544, 2013.9
- 2) 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, 1997.1
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施

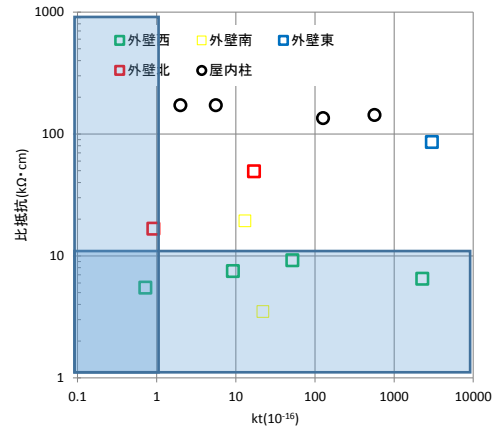


図-11 透気係数と比抵抗の関係(建物 AI)

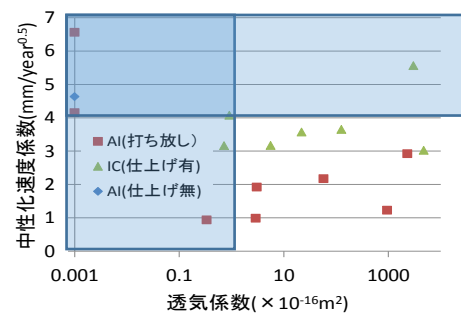


図-12 透気係数と質量含水率の関係

工指針同解説, 2004

- 4) Roberto Torrent, Imamoto Kei-ichi: Site testing of air-permeability as indicator for carbonation rate old structures, International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures, 2015.5
- 5) 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 の課題に対する検討, コンクリート工学年次論文集, vol.32 No.1, pp 1755-1780, 2010.6
- 6) 鶴木圭一, 兼松学: 局所的な内部温・湿度環境がコンクリート造建築物に及ぼす影響に関する研究基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, vol.31, No.1, pp968-972, 2009.7
- 7) 木野瀬透ほか: コンクリート中水分が中性化の進行速度および鉄筋腐食に及ぼす影響, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.84-87, 2015.3
- 8) 物理探査学会: 物理探査ハンドブック手法編, 1998
- 9) 下澤和幸ほか: かぶりコンクリートの鉄筋腐食抵抗性能評価のためのドリル PR 法の適用性の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 646 号, pp.2145-2153, 2009.12