

透気係数を用いたコンクリート構造物の塩害劣化予測に関する研究

林亮太¹, 添田政司², 櫛原弘貴³

福岡大学大学院 工学研究科, 福岡大学 工学部

概要：45字×4行以内：本研究は、コンクリート構造物の品質を把握する方法として、透気係数に着目し、実構造物のコア供試体と室内実験で作製した供試体を用いて、透気係数と拡散係数の相関性を検討した。また、細孔径分布の測定により、各種係数の支配的要因を検討した。その結果、透気係数と実効拡散係数に影響を及ぼす空隙径は類似しており、両者に相関性が存在する可能性が示唆された。

1. はじめに

コンクリート構造物を適切に維持管理していく上で、鉄筋までのかぶりコンクリートの品質を把握する必要がある。既存コンクリートの品質確認の一つに、コアを採取して汎用的に圧縮強度が用いられているが、この測定値から物質移動抵抗性までを評価するのは難しい。そのため、採取コアを用いた透気係数の測定によって物質移動抵抗性を評価する試みを行っている¹⁾。透気係数は、中性化の進行に対しては、養生条件や水セメント比に関らず、セメント種類ごとに良好な相関性の存在が確認されているが¹⁾、塩化物イオンの浸透に対しては、評価が難しいのが現状である。これは、透気係数の場合には、コンクリートの空隙構造と含水率の影響が支配的であるのに対し、塩化物イオンの浸透の場合には、毛細管張力や水分移動、濃度拡散と言った事象が影響を及ぼすことによるものと考えられる。

ただし、塩化物イオンの浸透性を評価する1つである電気泳動試験においては、飽水コンクリートを用いるため毛細管張力等の影響を受けず、液状水間の塩化物イオンの移動を評価するためコンクリートの空隙構造が主とした支配的要因になると予想される。そのため、透気係数と実効拡散係数の間に少なからずある一定の相関性が存在するものと思われる。

また、コンクリート標準示方書維持管理編においては、実効拡散係数から見かけの塩化物イオン拡散係数に変換する方法が記載されており、透気係数から実行拡散、そして見かけの塩化物イオン拡散係数へと転換していくことにより、透気係数によって中性化の進行予測以外にも塩化物イオンの浸透予測にも利用できる可能性が高いと考える。

そこで本研究は、建設23年になる海洋環境下における護岸コンクリートから採取したコアおよび実験室内で作成した各種コンクリート供試体を用いて、塩化物イオン浸透性状と透気係数

の関係性について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 実構造物から採取した供試体

実験に用いた採取コアは、図-1に示す護岸コンクリートの飛沫帯および干満帯から採取した。いずれの箇所もコンクリートに高炉セメントあるいはフライアッシュが使用されており建設23年目のものである。高炉セメントを使用しているコンクリート(以下、BB)は、水セメント比65%のものであり、 $\phi 9.0\text{cm} \times 18\text{cm}$ の採取コアを用いて計測された圧縮強度は、飛沫帯において 31.3N/mm^2 、干満帯で 28.9N/mm^2 であった。一方の、フライアッシュが使用しているコンクリート(以下、FA)は、水セメント45%のものであり、フライアッシュを普通セメント量に対して30%置換されたものである。圧縮強度は、それぞれ飛沫帯において 39.6N/mm^2 、干満帯で 41.2N/mm^2 であり、水セメント比の影響にもよりFAの方がBBに比べていずれの環境においても強度が高くなっている。表-1には、各種コンクリートの圧縮強度を示している。

2.2 作製供試体

水セメント比やセメント種類の違いを検討するために実験室内で作成したコンクリートには、セメントとして、普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3)、高炉セメント(密度 3.02g/cm^3)、フライアッシュJISⅡ種(密度 2.33g/cm^3)をセメントの質量の20%に置換したものを用いた。細骨材には、海砂(表乾密度 2.58g/cm^3)、粗骨材には、最大寸法20mmの碎石(表乾密度 2.67g/cm^3)をそれぞれ使用している。水セメント比は、45%、55%、65%と変化させた3水準の供試体を作製した。なお、スランプは $8 \pm 1\text{cm}$ 、空気量は $4.0 \pm 1\%$ としている。表-2には、実験に用いたコンクリート配合を示している。供試体の形状は、透気係数の測定用 $\phi 7.5\text{cm} \times 15\text{cm}$ および塩水浸漬、電気泳動試験用に $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ の円柱供試

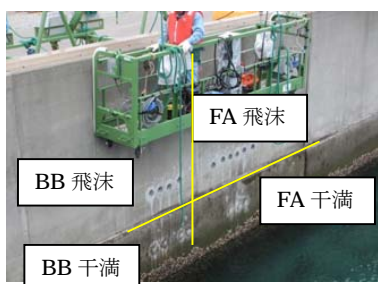


図-1 調査した護岸コンクリート

表-1 護岸コンクリートの圧縮強度

採取コア	飛沫帯	干満帯
BB	31.3N/mm ²	28.9N/mm ²
FA	39.6N/mm ²	41.2N/mm ²

表-2 実験に用いたコンクリート配合

コンクリート種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					AE剤 CX(%)	AE減水剤 CX(%)	SL (cm)	Air (%)	
			W	C			S					G
				普通	高炉	フライアッシュ						
OPC	45	44	165	366	0	0	765	1007	0.015	0.004	8.0	3.5
	55	46		300	0	0	825	995	0.016	0.004	8.5	4.0
	65	48		255	0	0	877	984	0.015	0.004	8.0	3.5
BB	45	44	165	0	366	0	765	1007	0.015	0.004	8.0	4.0
	55	46		0	300	0	826	1003	0.015	0.004	8.0	5.0
	65	48		0	255	0	880	987	0.017	0.004	7.0	4.0
FA	45	38	160	284	0	71	666	1125	0.013	0.052	8.0	4.0
	55	40	162	233	0	59	721	1112	0.012	0.038	9.0	3.5
	65	44	162	199	0	50	810	1067	0.013	0.038	7.0	3.5

体をそれぞれ作製した。供試体作製の翌日に脱型を行った後、気中養生(温度 20℃, 湿度 60%)および水中養生(温度 20℃)を 28 日行った。養生終了後に、透気試験用および電気泳動用は高さ 5cm, 塩水浸漬用は高さ 10cm にカットした。

2. 3作製供試体

海洋コンクリート構造物からφ9cm×20cmのコンクリートコアを採取し、図-2に示すとおり塩化物イオンが浸透している範囲を1cmの深さごとに JIS A 1154 に準拠して全塩化物イオン量の測定を行った。また、塩化物イオンが未浸透域のコア端部をコンクリートカッターで切りだし、促進試験による性能評価として、高さ 10cm でカットした供試体を用いて塩水浸漬試験、高さ 5cm の供試体を用いて加圧透気試験¹⁾および電気泳動試験をそれぞれ実施した。

塩水浸漬試験は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」、JSCE-G572「浸漬によるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの塩化物イオン拡散係数試験方法(案)」に準じて行った。切断面以外をエポキシ樹脂で被覆し、樹脂の硬化後に温度 20±2℃環境下で 10%濃度の NaCl 溶液に 200 日間の浸漬を行った。その後はコンクリート用ドリルを用いて、試験面から深さ方向に 5mm 間隔で試料を 40mm 位置まで採取した。深さごとに採取した試

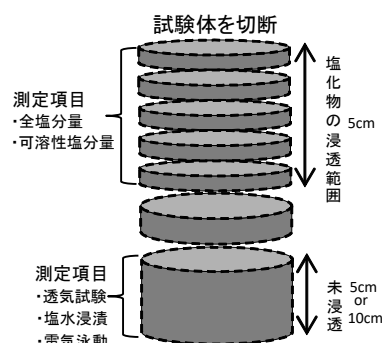


図-2 実構造物から採取したコアの概要

料を用いて電位差滴定装置により、全塩化物イオン量を測定した。また、Fickの拡散方程式により見かけの塩化物イオン拡散係数を算出した。一方の、電気泳動試験は、塩水浸漬試験と同様に塩化物イオンが未浸透部のコンクリート部を厚さ 50mm でカットし、円周面をエポキシ樹脂で被覆した後に、真空飽和処理を行い JSCE-G571「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの塩化物イオン実効拡散係数試験方法」に準拠して行った。

加圧透気試験は、採取コアにおいては電気泳動試験を実施前の供試体を用いて行った。また、室内作製の供試体は、加圧透気試験用に作製した供試体を用いた。側面部からの空気の流出を防ぐために円周部をアルミテープで被覆した後

に、図-3および図-4に示すメタル管の内部に供試体を設置し、メタル管と供試体の接触面の隙間をブチル製の両面テープでシールして行った。供試体の設置後は、コンプレッサから载荷圧力 $P_1=0.6\text{MPa}$ の圧縮空気を注入して、水を張った容器とメスシリンダーを用いた水中置換法により透気量を1分間隔で測定していき、透気量の変動がなくなった時点で、次式を用いて透気係数を算出した。

$$K = \frac{2hP_2r}{P_1^2 - P_2^2} \frac{Q}{A} \quad (1)$$

ただし、 K ：透気係数 (cm/s)、 h ：供試体厚さ (cm)、 P_1 、 P_2 ：载荷圧力、大気圧力 (MPa)、 Q ：透気量 (cm³/s)、 A ：透気面積 (cm²)、 r ：気体の単位容積量 (MPa) とする。

なお、加圧透気試験を実施する際のコンクリートの含水率は、測定時の重量と絶乾時の重量の差を飽水時の重量から絶乾時の重量の差で除して算出した。その結果、採取コアで $60 \pm 3\%$ 、作製コンクリートで $73 \sim 75\%$ 程度であった。



図-3 透気試験機の概要

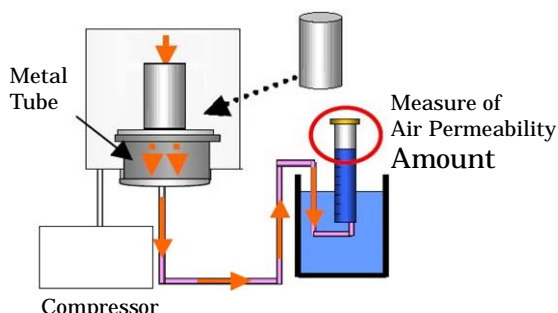


図-4 透気係数の測定方法

3. 結果および考察

3.1 実構造物からの採取コアによる検討

図-5は、採取コアにおける実環境で浸透した全塩化物イオンならびに未浸透部のコアを用いて浸漬試験によって算出した見かけの拡散係数と透気係数の関係を示す。なお、実構造物の

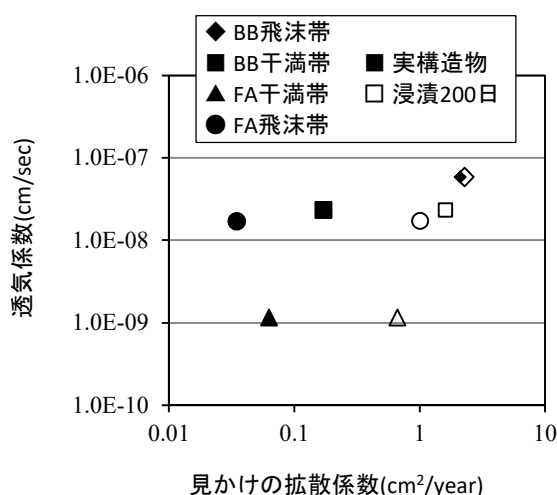


図-5 透気係数と見かけの拡散係数の関係

結果と浸漬による結果で見かけの塩化物イオン拡散係数に大きな乖離があったため、測定値の見やすさから対数軸で表示している。この結果、透気係数と見かけの拡散係数との間には相関性は確認されず、塩化物イオンの浸透と空気の透過の機構が異なっていることが確認された。また、実構造物と浸漬による見かけの拡散係数が大きく乖離している点については、見かけの拡散係数は経時的にある年数まで低下していくとされており、この影響によるものと考えられる。この見かけの拡散係数が経時的な特性から透気係数では、塩化物イオンの浸透を予測することは難しいと思われる。

図-6には、透気係数と実効拡散係数との関係を示す。この結果、透気係数の増加に従って実効拡散係数も大きくなる傾向が見られた。測定点が少ないが、両者にある程度の相関性が存在する可能性が伺えた。

そこで、実構造物のBBとFAのコア供試体における、見かけの拡散係数、実効拡散係数、透気係数に及ぼす空隙構造の影響を明らかにするため、図-7に示すように、ある範囲の細孔径の空隙量と各種係数の関係を表し、線形近似曲線による相関係数 R^2 で評価した。

図-8は、各種係数と図-7により空隙径ごとに得られた相関係数 R^2 をまとめたものの関係を示す。この結果、実環境下での見かけの塩化物イオン拡散係数は、 $50\text{nm} \sim 200\text{nm}$ の範囲の径で最も高い相関係数が得られ、空隙径が大きくなるに従って相関係数は小さくなっている。一方の、塩水浸漬試験によって算出された見かけの塩化物イオン拡散係数では、 $50\text{nm} \sim 200\text{nm}$ よりも大きな $200\text{nm} \sim 1000\text{nm}$ の範囲の径で高い相関係数が得られおり、実構造物と塩水浸漬試験によって塩化物イオン浸透に影響する空隙径が異

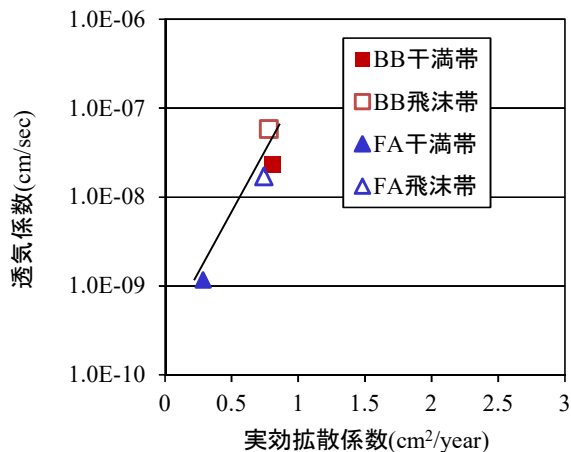


図-6 透気係数と実効拡散係数の関係

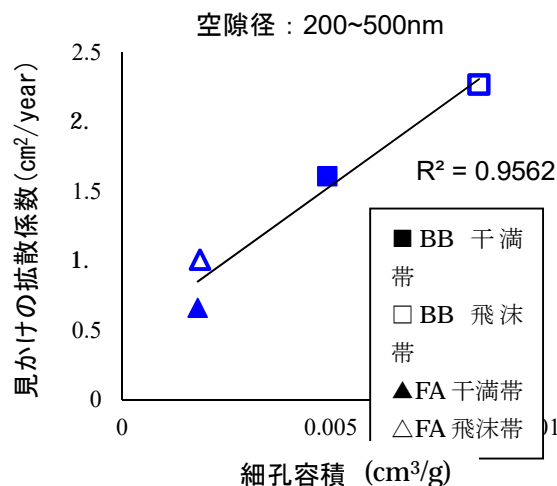


図-7 相関係数の算出例

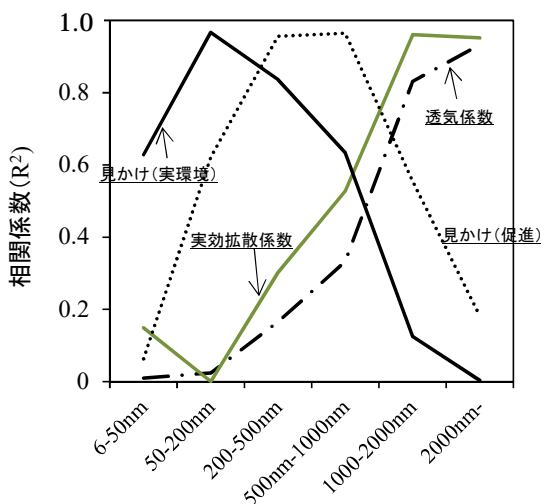


図-8 細孔径と各種係数との関係(実構造物)

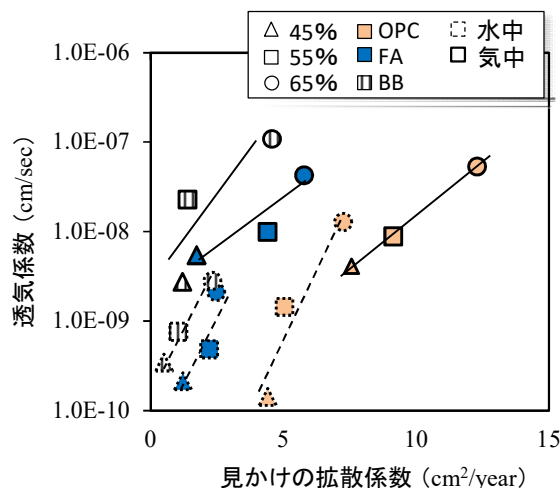


図-9 透気係数と見かけの拡散係数の関係

なることが分かった。今回採取したコンクリートは、干満帯と飛沫帯のものであるため、乾湿繰り返しを受けることにより、50nm~200nm 範囲の比較的小さな細孔径による毛細管張力の働きが大きく影響したものと思われる。一方の、透気係数と実効拡散係数では、空隙径が大きくなるに従って相関係数も大きくなる傾向を示し、両者とも全体的な傾向としても類似している。特に、影響の大きい空隙径は、比較的大きな1000nm以上の径であった。以上のことから、透気係数および実効拡散係数に与える空隙径の類似性から両者には相関性が見られる可能性が高いことが分かる。

3. 2作製供試体による検討

上記の「3. 1実構造物からの採取コアによる

検討」の実験結果を踏まえ、より詳細な検討を行うために、室内試験でセメント種類や水セメント比、養生条件が異なる供試体を作製した結果について述べる。

図-9は、透気係数と見かけの塩化物イオン拡散係数の関係を示す。いずれのセメント種類においても透気係数の低下に従って、見かけの塩化物イオン拡散係数が低下しているのが分かる。ただし、セメント種類や養生条件が同一である場合のみに相関性が確認されている。各種コンクリートの見かけの塩化物イオン拡散係数は、いずれの養生条件においても透気係数が同値の場合には、OPC、FA、BBの順で小さくなる結果となった。また、BB、FAの見かけの塩化物イオン拡散係数は特に小さく、気中養生を行った場合でも遮塩性は極めて高いことが分かる。

例えば、養生条件が異なる場合には、見かけの塩化物イオン拡散係数が同値でも透気係数には大きな差が見られている。これは、図-8 に示した様に、それぞれの係数に及ぼす空隙径に相違があるためと考えられ、図-5 に示した実構造物の結果と同様に透気係数から見かけの塩化物イオン拡散係数を評価することが難しいものと考えられる。

図-10 は、作成した供試体における透気係数と実効拡散係数の関係を示したものである。拡散セルの都合上で水セメント比 45% の BB, FA においては電気泳動試験を実施していないが、水中養生を行ったものは、セメント種類や水セメント比の違いに関らず、高い相関性が得られた。また、図-6 に示した実構造物から採取したコアによる透気係数と実効拡散係数の関係性よりも右側にシフトしているが、これは、透気係数の測定時における含水率の影響によるものと推察される。なお、実構造物から採取したコアでは、含水率 60%、本測定供試体では、75%程度であった。同一供試体においても含水率が高い場合には、透気係数が小さくなるのが分かっており、このことが図-6 と図-10 における近似の傾きが異なった要因と考えられる。つまり、得られた透気係数に対して含水率の影響を明確にすれば、透気係数から実効拡散係数を推定できる可能性が高い。一方の、気中養生を行ったものには、透気係数と実効拡散係数の間に相関性は認められなかった。これは、実効拡散係数を測定する際の前処理としての真空飽水処理、あるいは電気泳動試験の過程で未反応のセメントに再水和が生じたことによって、透気係数を測定した時点よりもコンクリート内部の空隙構造が変化した可能性がある。以上のことから、透気係数を測定することで、セメント種類等の情報を加味せずに、実効拡散係数を推定することができることが示唆された。

図-11 は、図-7 に示した方法で、室内作製の供試体 (OPC, FA, BB の水中養生) の細孔径が各種係数に与える影響を相関係数で表したものである。この結果、見かけの拡散係数は 200 ~ 1000nm 付近の径で最も高い相関係数が得られ、その以降では、空隙径が大きくなるに従って相関係数は小さくなっている。一方の、実効拡散係数と透気係数は、これまでの結果と同様に空隙径が大きくなるに従って相関係数も大きくなる傾向を示しており、さらに両者とも全体的な傾向としても類似している。特に、比較的大きな 1000nm 以上の径が影響しているのが分かる。以上のことから、見かけの塩化物イオン

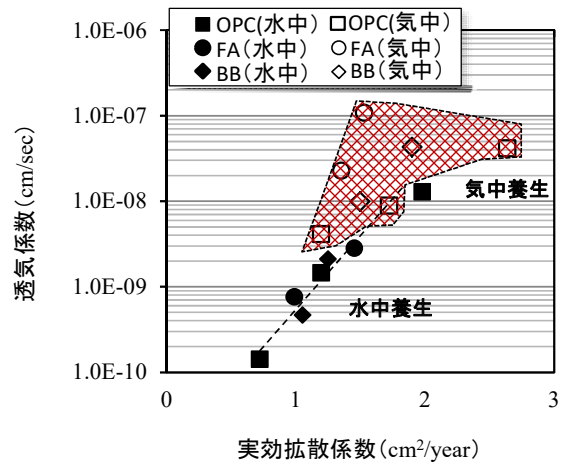


図-10 透気係数と実効拡散係数の関係

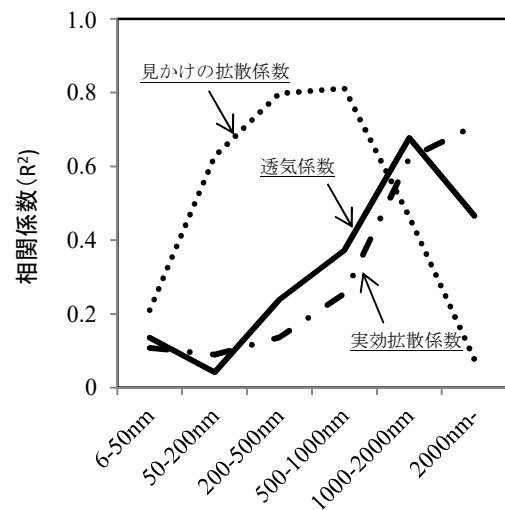


図-11 細孔径と各種係数との関係 (室内作製)

拡散係数と実効拡散係数では、同じ塩化物イオンの浸透性を評価しているものであるが、それらに与える空隙径が大きく異なることが本試験の結果からも確認できた。また、実効拡散係数と透気係数の間には、それらに与える空隙径が類似しており、その結果、高い相関性が得られることが分かった。この透気係数によって、測定時の含水率を補正することによって、簡易的に実効拡散係数を推定できる可能性がある。

なお、今回の検討の範囲では測定点も少ないことから、今後も継続して新たな実構造物からの採取コンクリートや作製供試体を用いて、更なるデータの蓄積を行っていく予定である。

4. まとめ

今回、透気係数と塩化物イオン浸透性状との関係性について検討を行った結果、以下の知見を得ることができた。

(1) 塩水浸漬における見かけの拡散係数には、200nm～1000nm の空隙径が大きく影響を及ぼし、乾湿繰り返しを受ける場合には、それよりも小さな空隙の影響が大きくなる。

(2) 透気係数と実効拡散係数の測定値に影響を及ぼす空隙径は、見かけの塩化物イオン拡散係数のものとは大きく異なっているが、両者は類似しており、比較的粗大空隙の影響が大きいことが分かった。

(3) 透気係数と見かけの塩化物イオン拡散係数の間には、同一セメントおよび養生条件の場合のみに相関性が得られた。

(4) 実行拡散係数と透気係数の間に、水セメント比やセメント種類に関らず高い相関性を確認した。

(5) 透気係数に及ぼすコンクリートの含水率の影響を明確にすることができれば、透気係数の値から実効拡散係数を推定できる可能性がある。

参考文献

- 1) 下澤 和幸, 今本 啓一, 山崎 順二, 永山 勝: 鉄筋コンクリート構造物の耐久性能検証のための透気性試験による指標値と中性化深さの関連についてコンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 2005-2010, 2009. 7
- 2) 山崎 順二, 今本 啓一, 下澤 和幸, 永山 勝: 原位置での簡易透気性とかぶり厚さによる RC 構造体の耐久性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1,

pp. 1999-2004, 2009. 7

- 3) 下澤 和幸, 永山勝, 今本啓一, 山崎順二, 二村誠二: かぶりコンクリートの耐久性能評価に関する簡易試験法の開発, シンポジウム, コンクリート構造物への非破壊検査の展開 (2006)JSNDI, pp. 291-296
- 4) 櫛原弘貴, 武若耕司, 山口明伸, 添田政司, 濱田秀則: けい酸塩系表面含浸材の表層品質改善効果が透気係数に与える影響に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文集報告集, 第 11 巻, pp. 329-336, 2011. 10
- 5) 河野俊一, 氏家勲: 乾燥によるコンクリートの透気係数の変化に関する研究, コンクリート工学年次論文集報告集, Vol. 21, No. 2, pp. 847-852, 1999
- 6) 蔵重勲, 廣永道彦: 透気係数の含水依存性を考慮したコンクリート表層品質の非破壊評価法の一提案, セメント・コンクリート論文集, No. 65, pp. 225-232, 2011
- 7) 林亮太, 櫛原弘貴, 添田政司, 松本涼: 透気係数による各種コンクリートの物質移動抵抗性評価方法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, 35/1, pp. 745-750, 2013. 7

謝辞:本研究は、一般社団法人九州建設技術管理協会「平成 30 年度建設技術研究開発助成」により実施したものである。ここに、厚く御礼申し上げます。