

論文 仕上げ塗装およびその劣化がコンクリートの透気係数に及ぼす影響

島田 修弥*1・神田 凌太郎*2・寺本 篤史*3

要旨：非破壊透気試験を用いた中性化速度の評価方法が報告されており，表層の透気係数を測定することによって中性化速度を予測することの可能性が示されている。しかし，塗装を有するコンクリートおよび塗装が劣化した場合のコンクリートの透気性に関する研究事例は数が少ない。本研究では，非破壊透気試験であるトレント法を用いて，塗装の劣化の有無によるコンクリートの透気性を評価することを試みた。その結果，非破壊透気試験によって，薬品を塗布することによる劣化手法を用いると，塗装種類にはよるものの，透気係数の増大に対して有効であることが分かった。

キーワード：二酸化炭素固定，非破壊透気試験，仕上げ塗装，塗装の劣化

1. はじめに

現在，地球温暖化問題への取り組みとして，二酸化炭素の排出削減技術の推進や大気中の二酸化炭素の固定化に関する検討が行われている。コンクリート構造物においては，炭酸化反応によって二酸化炭素固定量が一定量見込まれることが報告されており，従来，中性化速度係数として評価されていたコンクリートの特性値が二酸化炭素固定量の予測指標の一つになりうる。

近年，非破壊透気試験を用いた中性化速度係数の評価方法が報告されており^{2),3),4)}，コンクリート構造物の表層の透気係数を測定することによって二酸化炭素固定量の予測精度を向上できる可能性がある。

しかし実際の鉄筋コンクリート造建築物の多くには塗装が施されており，その塗装も経年劣化によって逐次，性能が変化している。塗装を有するコンクリートの透気性については今本ら⁵⁾によって検討されているものの，塗装の劣化を考慮してコンクリートの透気性を検討した事例はほとんどない。

そこで本研究では，非破壊透気試験であるダブルチャンバー法（トレント法）を用いて，塗装の有無およびその後の劣化がコンクリートの透気係数に及ぼす影響を実験的に取得し，塗装の有無および劣化の有無によるコンクリートの透気性の変化を評価することを試みた。この際，塗装の促進劣化方法として一般的に用いられている紫外線照射は，透気試験を行う一般的なコンクリート試験体の大きさに適しておらず，コンクリートに施された塗装を促進劣化する手法についても検討を実施した。

前，塗装の各工程後，塗装完了後，塗装の劣化処理後にそれぞれ透気試験を行うことによって各段階におけるみかけの透気係数を取得した。

2.1 透気試験の方法

本研究では，透気試験の方法としてダブルチャンバー法（以降，DC 法と称す。）を用いた。DC 法の概要を図-1 に示す。測定部の内部チャンバーと圧力調整用の外部チャンバーの独立 2 構造から成り立っており，透気係数 K_t はチャンバー内を減圧し，減圧終了後から規定の圧力に達するまでにかかる時間から算出される。

なお，DC 法によって得られる透気係数は，コンクリートが塗材を有する場合，塗材を含めたコンクリートの透気係数であると考えられている⁵⁾。

2.2 試験体概要

本研究で使用した塗材の一覧を表-1 に示す。なお，対象とした塗材は建築外装仕上げ材として一般的に適用されているもので，濱崎ら⁶⁾の論文を参考に選定した。

また，コンクリートの調合条件を表-2，使用材料を表-3 に示す。標準養生材齢 28 日における圧縮強度は

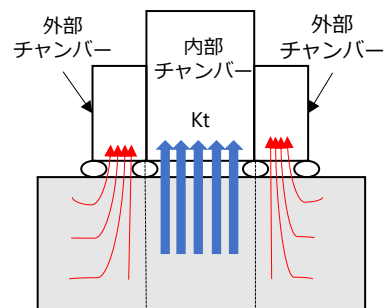


図-1 DC 法概要図

2. 非破壊透気試験における実験概要

本研究では，コンクリートの透気係数に及ぼす塗装の種類及び塗装の劣化の影響について検討するため，塗装

*1 広島大学 先進理工系科学研究科 (学生会員)

*2 広島大学 工学部 (非会員)

*3 広島大学 先進理工系科学研究科 准教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 本研究において使用した塗材

記号	塗装種類	所要量 (kg/m ²)			
		下塗材	主材 1	主材 2	上塗材
a	防水性薄塗材 E	0.12	0.83	0.67	-
b	複層塗材 E	0.08	0.93	0.83	0.29
c	防水形複層塗材 E	0.05	2.98	1.05	0.19
d	マスチック A	0.07	1.66	-	-
e	つや有り合成樹脂エマルジョンペイント	0.14	-	-	0.27
f	可とう系改修塗材 E	0.05	1.03	-	0.30

表-2 調合条件

単位量 (kg/m ³)							
水	セメント	細骨材		粗骨材			混和剤
W	C	S1	S2	G1	G2	G3	A
191	360	348	483	313	132	455	3.60

表-3 使用材料

材料名	種類及び物性値
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	S1:広島県福山市鋼管町産スラグ骨材 (密度=2.76g/cm ³)
	S2:広島県東広島市黒瀬町小多田産 砕砂 (密度=2.57g/cm ³)
粗骨材	G1:広島県呉市広町産砕石 (密度=2.65g/cm ³ , 粒径範囲 10～20mm)
	G2:広島県呉市広町産砕石 (密度=2.65g/cm ³ , 粒径範囲 5～15mm)
	G3:大分県津久見市小園町産石灰石 砕石 (密度=2.71g/cm ³)
混和剤	AE 減水材 (リグニンスルホン酸塩ポリカルボン 酸系化合物)

27.8N/mm², 現場封緘養生材齢 28 日における圧縮強度は 23.1N/mm²であった。

透気試験用のコンクリートは 150*150*150mm の角柱試験体とし、底面を試験面とした。コンクリートの養生は打設後 3 日で脱型し、脱型後の 28 日間を 20℃・60%RH の気中養生とし、その後、各種塗装を施した。

3 劣化した塗装を施したコンクリートの透気係数の評価に向けた事前検討

3.1 塗装の促進劣化に関する検討

1 章でも述べたように、塗装を劣化させる方法として、一般的に塗材の耐候性試験で用いられるキセノンウェザーメーター⁷⁾やサンシャインウェザーメーター⁸⁾など紫外線を一定時間照射させる方法を用いられている。しかし、これらの試験機のなかにコンクリートの非破壊透気試験体を設置しようとした場合、試験体数が著しく限定

される。また、試験体及び光源の大きさからコンクリートに施された塗装に紫外線を均一に当てることも困難である。そのため、本研究の実施にあたり、紫外線を用いない塗装の促進劣化手法が必要とされたが、高分子系の論文を含めほとんど知見がないため、紫外線を用いずに促進劣化する方法についても別途検討する必要がある。

そこで本研究ではまず、スレート板に施した塗材に対して紫外線を用いずに促進劣化について、塗装種類及び劣化因子をパラメータとした試験体を作製し、光沢度試験によって各種塗装の劣化を評価した。

(1) 実験概要

塗装の劣化手法に関しては既往研究から得られた試験結果及びメカニズムより紫外線を用いずに塗装が劣化すると考えられる劣化因子を 4 種類選定し、塗装は表-1 に示す 6 種類を用いた。劣化因子には薬品による劣化方法として、5.0wt% 次亜塩素酸ナトリウム水溶液、3.0wt% 過酸化水素水、フタル酸ジイソブチルを用い、物理的な劣化方法として、70℃ 定常での加熱する方法を用いた。なお、フタル酸ジイソブチルは炭素結合の破壊による劣化が起きるとされていること⁹⁾から塗装における紫外線による劣化のメカニズムと似ていると考え、次亜塩素酸ナトリウム、過酸化水素水は酸化剤として塗装を劣化させる役割を果たすとされていること¹⁰⁾¹¹⁾、加熱による劣化に関しては、山田ら¹²⁾の実験によって加熱＋紫外線の組み合わせの場合において光沢度の低下がみられたことから、それぞれ選定している。

塗装の基盤には前述の劣化因子の影響をほとんど受けないスレート板を用いた。150*70mm のスレート板に表-1 に示す 6 種類の塗装を施し、塗材の乾燥後に上述の 4 種類の促進劣化方法を与えた。促進劣化の各サイクルにおいて、JIS Z 8741 に準拠して光沢度試験を行った。光沢度試験は Gloss Meter VG2000 を用いて行い、入射角は 85 度としている。各種薬品は、濃度や塗布量によっ

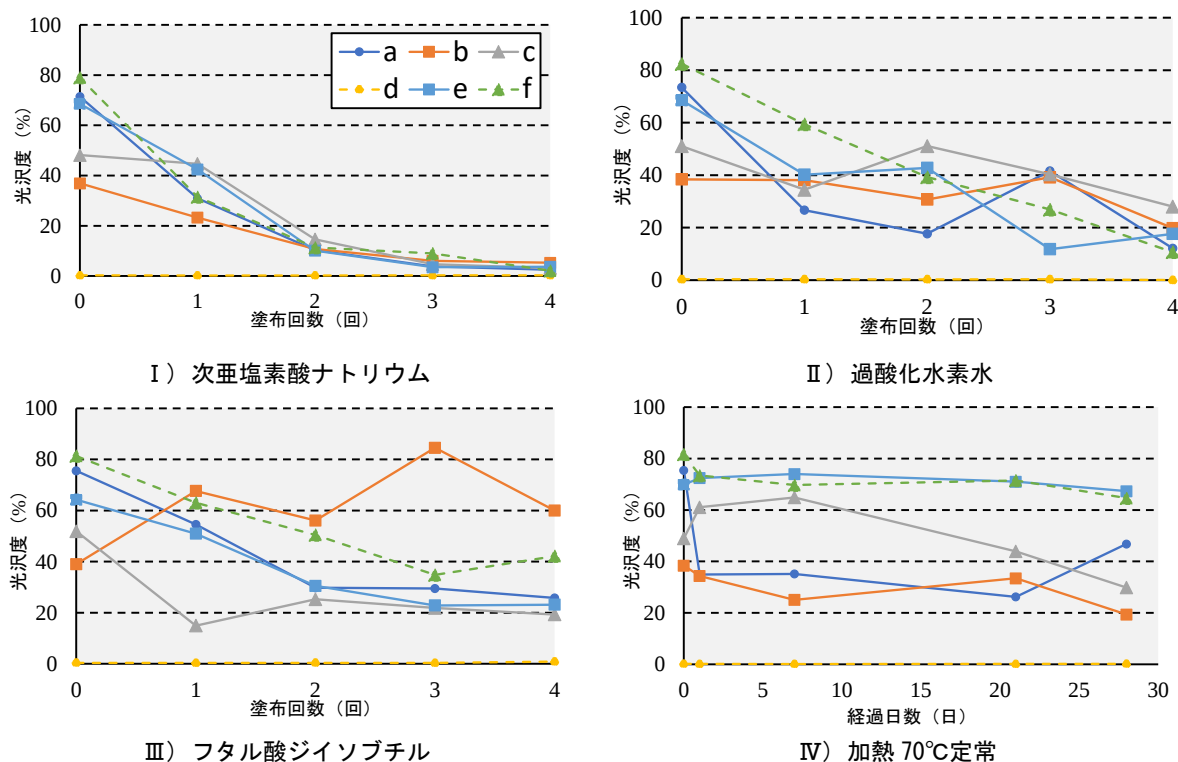


図-2 劣化因子ごとの塗布回数と光沢度の関係

て促進劣化効果が異なると考えられるが、本検討では試行的に、刷毛を用いて $95\text{g}/\text{m}^2$ 塗布する手法を採用した。薬品の塗布は4サイクル行い、薬品塗布後、およそ1日間乾燥させた後、光沢度の測定に供した。なお、薬品の塗布による光沢度の測定は1, 3, 7, 28日に行い、測定日から次の測定日までを1サイクルとする。

(2) 実験結果及び考察

各種促進劣化を施した試験体の光沢度試験の結果を図-2に示す。なお、加熱による劣化に関しては加熱を開始してからの経過日数と光沢度の関係をプロットしている。

図-2 (IV) より、加熱を行うだけでは、塗装の光沢度にほとんど変化がないことが分かる。また、薬品による劣化に関しては、次亜塩素酸ナトリウムを塗布することですべての塗装において塗布ごとに光沢度が低下していることが分かる。一方、過酸化水素水は、塗装 e (つや有り合成樹脂エマルジョンペイント)、f (可とう系改修塗材 E) のように光沢度が顕著に低下している塗装はあるものの、ほとんど光沢度に変化が生じていない塗装もある。理由として、次亜塩素酸ナトリウムは酸化剤としての役割だけでなく、Y シャツの袖や襟などの芯地に塩素系漂白剤を用いると襟や袖が黄変する現象のように、塗装に含まれている樹脂と塩素の反応することで黄変する現象によって塗装表面の光沢度が低下した可能性が考えられる。また、過酸化水素水には樹脂を黄変させる塩素は含まれていないため、酸化剤間でも光沢度の変化量

にこのような差が生じ可能性が考えられる。

また、塗装 b (複層塗材 E) にフタル酸ジイソブチルを塗布する際に生じた塗布によって光沢度が上昇する現象については、フタル酸ジイソブチルの可塑剤としての効果で塗装を軟化させたときに生じる艶によって発生したためと推察される。

以上より、加熱による劣化は塗装の劣化に影響を及ぼさないと考え、透気係数を測定する際には、この実験で使用した薬品3種類を劣化因子として用いることとした。

3.2 コンクリートの乾燥状態が透気係数に及ぼす影響に関する検討

コンクリートの含水率が大きいと透気係数は小さくなり、塗装の接着一体性も低下する可能性がある。そこで、塗装を施す日程を決定するため、3体の試験体を用いて、脱型後 $20^\circ\text{C}60\%\text{RH}$ に静置し乾燥材齢 3, 7, 14, 21, 28 日に質量及び透気係数の測定を行い、コンクリートの乾燥状態が透気係数に及ぼす影響を検討した。

測定した各試験体の材齢と質量変化量及び透気係数の関係を図-3に示す。その結果、乾燥に伴い透気係数が増大していること、乾燥材齢 28 日で質量変化及び試験体①、②の透気係数の変化が小さくなっていることが分かる。試験体③については、外観上に目立った差異は見られないが、内部空隙量が他の試験体よりも多くなっている可能性が考えられる。

4 塗装がコンクリートの透気係数に及ぼす影響

一般に外壁塗装は何層もの膜によってできており、それが表層から徐々に劣化が深部に進行して行くことによって塗装全体の劣化が進行すると考えたため、塗装の各工程での透気係数も取得した。

塗装種類、塗装工程ごとの透気係数の推移を図-4 に示す。また、各塗装に 10 体の試験体の透気係数を取得し、図-4 は 10 体の平均値を算出している。10 体の間の透気係数のばらつきは図-5 の箱ひげ図で表している。

図-4 の結果から、下塗りは透気係数にほとんど影響せず、主塗りの段階で大きく透気係数が減少する傾向がみられた。下塗り材には水性のシーラーが主に使われており、コンクリートに一部浸透しているうえ、塗布量も非常に少なくコンクリートの空隙をふさぐほどの量ではないため透気係数にほとんど影響がなかったと考えられる。また、主塗り以降は、下塗りと比べて塗布量も多く膜厚も大きいいため、コンクリートにほぼ圧力変化が生じることがなく、塗膜の透気係数を測定している状態に近くなっていると考えられる。このことから、図-4 の主塗り以降の実験結果は塗膜の密度の影響が大きくなっている可能性が考えられる。

5 塗装劣化がコンクリートの透気係数に及ぼす影響

5.1 塗装劣化後の透気試験の結果及び考察

3.1 節の光沢度試験の結果から、加熱による劣化は塗装の劣化に影響を及ぼさないと考え、光沢度試験で使った薬品 3 種類を透気試験に使用する劣化因子として用いた。また、測定は塗材が十分に乾燥した後にを行い、薬品による劣化については刷毛を用いて行うものとし、塗布量はすべての薬品において 90g/m^2 した。

同じ塗装、同じ劣化因子を施した 2 体のコンクリートの劣化前後の透気係数をそれぞれ平均し、塗布後の透気係数と塗布前の透気係数の差からパラメータごとの透気係数の変化量を表したものを図-6 に示す。この図では、「A1」のように塗装種類を表すアルファベットに劣化因子を表す数字で表している。また、これらの図において、塗装 e（つや有り合成樹脂エマルジョンペイント）及び塗装 f（可とう系改修塗材 E）にフタル酸ジイソブチルを塗布した試験体で透気係数の測定を行ったところ、2 体のうち 1 体が試験中に透気試験機のチャンバーによる圧力によって塗膜が破れ急激に圧力が上昇し、測定不能となったため、図には残りの試験体から得られた値のみを記載している。

図より、塗装 d（マスキック A）は 3 種いずれの促進劣化手法において、透気係数が増大していることが分かる。一方で、塗装 c（防水形複層塗材 E）はすべての劣化因子において透気係数が変化することはなかった。

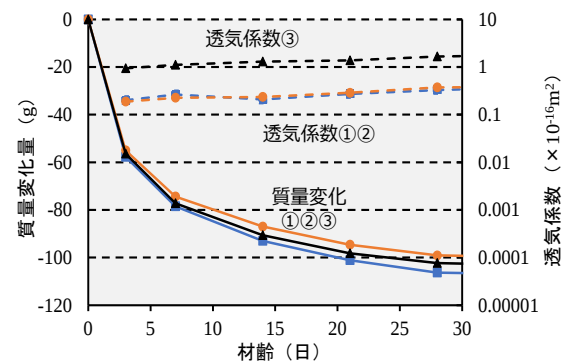


図-3 材齢と質量変化量及び透気係数の関係

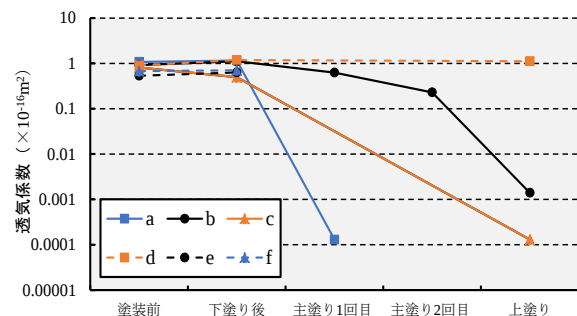


図-4 塗装種類及び工程ごとの透気係数

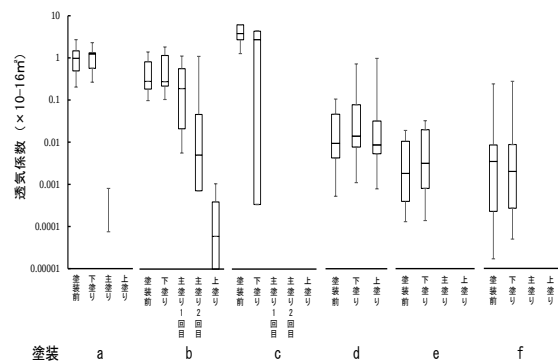


図-5 塗装種類及び工程ごとの箱ひげ図

劣化因子ごとに透気係数に及ぼす影響を整理すると、フタル酸ジイソブチルによる促進劣化手法は塗装 c を除いて、透気係数の増大に寄与することが確認され、特に塗装 d（マスキック A）を使用した試験体において透気係数が大きく増大している。

塗装 d は塗装の寿命が短く、耐候性も他の塗装に比べて小さい¹³⁾¹⁴⁾とされている。そのため、炭素結合の破壊を想定している劣化因子であるフタル酸ジイソブチルによって大きく透気係数が変動したと考えられる。

また、光沢度の変化量と透気係数の変化量の関係を図-7 に示す。図-7 から光沢度の低下量と透気係数の増加量には高い相関性は確認されなかった。このことは、塗装の種類によって、表層部の劣化と膜厚方向の劣化の進行に時間的な差異があることを示している。

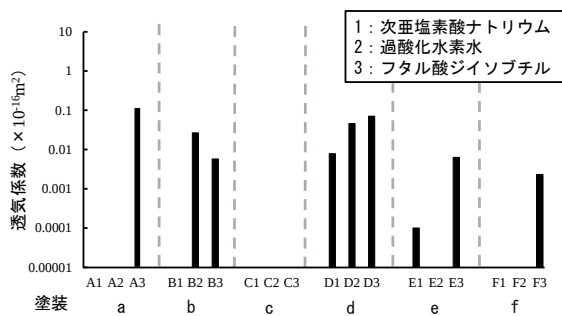


図-6 パラメータごとの透気係数の変化量

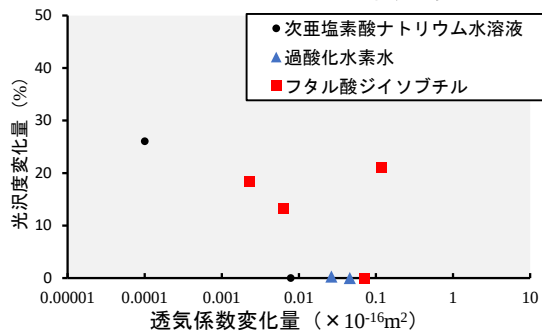


図-7 塗装の劣化による光沢度の変化量と透気係数の変化量の関係性

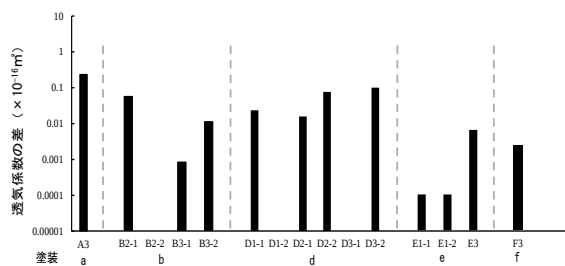


図-8 塗装劣化後と塗装劣化前の透気係数の差

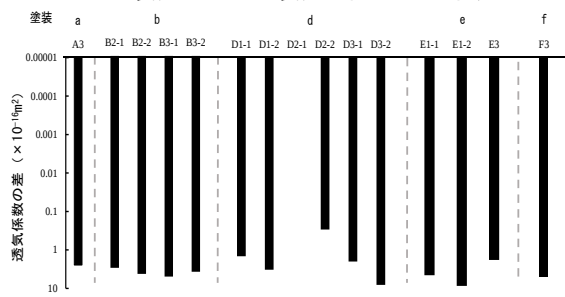


図-9 塗装劣化後と塗装前の透気係数の差

5.2 各塗装，劣化因子における塗装劣化の度合いの推察

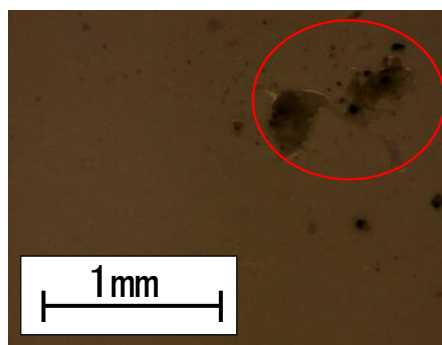
本実験において，試験体に塗られた塗装に劣化を施した際の厚さ方向の影響深さの範囲について推察するため，透気係数に変化が生じた試験体の塗装前，塗装後の透気係数と塗装劣化後の透気係数の変化を示すため，塗装劣化後の透気係数から塗装劣化前の透気係数を差し引いたもの及び塗装前の透気係数を差し引いたものの推移を図-8，9 に示す。これらの図から，今回比較したほぼすべての試験体において，塗装を劣化させた試験体は塗装が完了した後に透気係数を測定したものに比べて小さくなっていることに加え，塗装を施す前のコンクリートの透気係数よりは小さくなっていることが分かる。

また，塗装の劣化後の様子をマイクロスコープによって175倍の縮尺で撮影したもの写真-1に示す。なお，今回はa及びcの塗装を施してフタル酸ジイソブチルを塗布したものを代表して示す。この写真から，透気試験において劣化現象が生じた塗装a（防水形薄塗材 E）が塗られている試験体のみ部分的に膜がホール状に破れている箇所が見受けられた。

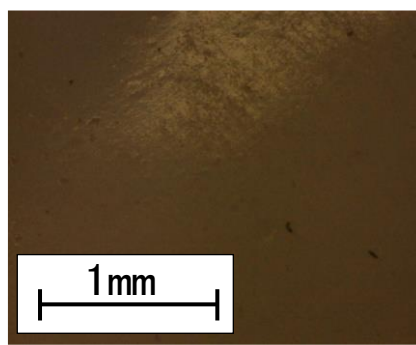
図-8，9及び写真-1から，本研究で使用した薬品による劣化を行うと，塗装が完全に劣化して塗装が剥がれることに近い状態ではなく，塗装の一部が劣化し，塗装の保護の役割が薬品塗布前に比べて損なわれている状態である可能性が考えられる。

前述より，これら薬品による劣化手法は塗装種類にはよるものの，いずれも透気係数の増大に対して有効であることが分かった。

さらに，このことに加えて，図-2に示すように塗布回数を増やすほど光沢度が減少する傾向があることから，本研究で行った非破壊透気試験においても，薬品の塗布回数を増やすようなサイクルを設けることで塗層の膜厚方向への劣化がより進行すると推察しており，これについては今後検討していきたいと考えている。



① a-防水形薄塗材 E



② c-防水形複層塗材 E

写真-1 劣化後の塗装の様子（フタル酸ジイソブチル）（175倍）

6 まとめ

塗装の劣化の有無によるコンクリートの透気性の評価及び塗装の劣化手法に関する検討を行うための実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 塗装の劣化手法に関する検討のために、光沢度試験を行った結果、加熱を行うだけでは、性状にほとんど変化がないことが分かった。また、薬品による劣化に関しては、薬品の塗布回数に応じて初期値と比べて光沢度が低下する傾向が得られた。
- (2) ほぼすべての塗装において下塗りは透気係数に影響を与えず、主塗りで以降の段階において透気係数が大きく減少することが分かった。
- (3) 塗装の劣化前後の透気係数において、フタル酸ジイソブチルによる劣化を施した試験体の透気係数が最も大きな変化を示した。その原因として炭素結合の切断によってピンホールが生じている可能性が考えられた。
- (4) 劣化前後の透気係数に変化があった試験体においても、上塗りをしていない状態の透気係数よりは小さくなっていること及び塗布回数を増やすほど光沢度が減少する傾向があることから、ある程度期間を設け、塗布回数を増やすことによって、塗膜の劣化を進行させることができ、透気抵抗性の劣化に対しても促進効果がある可能性が考えられた。

謝辞

本研究はグリーンイノベーション基金「CO₂ 排出削減・固定量最大化コンクリートの品質管理・固定料評価手法に関する技術開発」の補助を受け実施した。また、塗装の選定および劣化手法にあたっては、芝浦工業大学の濱崎仁博士、北海道大学の北垣亮馬博士に貴重なご意見を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 黒田 泰弘, 菊池 俊文: 解体コンクリートによる二酸化炭素の固定, コンクリート工学論文集, Vol.20, No.1, 2009.1
- 2) 加藤 猛, 今本 啓一, 清原 千鶴, 山崎 順二: 透気試験複合法による仕上材付きコンクリートの中性化速度の評価手法に関する実験的検討, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, 2018
- 3) 唐沢 智之 古賀 一八 浦川 和也 河野 政典: 仕上塗材の中性化抑制効果と透気性に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008
- 4) 野中英, 湯浅昇: 簡易透気試験による構造体コンクリートの中性化抵抗性の評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.711, pp.727-734, 2015.5

- 5) 庭野究, 今本啓一, 陣内浩, 清原千鶴: 非破壊透気試験を用いた仕上げ材を有するコンクリートの中性化速度の評価方法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.722, pp.655-663, 2016.4
- 6) 濱崎仁, 本橋健司, 越中谷光太郎, 則竹慎也, 松沢晃一, 土屋直子: 建築用外装仕上材の中性化抑制効果の評価方法および評価基準に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.87, No.797, pp.600-609, 2022.7
- 7) 奥田章子, 斎藤俊, 後藤善光: フッ素樹脂系粉体塗装の実用化に関する研究, 日本建築技術報告集, Vol.27, No.65, pp.42-47, 2021.2
- 8) 植松俊幸, 小林利充, 神代泰道: 仕上げ材による中性化抑制効果およびその持続性に関する実験的研究, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, 2020
- 9) 高橋保, 菅野研一郎: 遷移元素を用いた炭素-炭素結合切断とその応用, 有機合成化学協会誌, Vol.61, No.10, pp.938-948, 2003
- 10) 森寛爾, 岡本一夫, 館和幸: 酸化剤水溶液中での紫外線照射による酸化チタン含有塗膜の劣化, 色材協会誌, Vol.75, No.5, pp.209-213, 2002
- 11) 館和幸: 過酸化水素水を用いた塗膜の耐候性試験技術, 色材協会誌, Vol.77, No.5, pp.213-220, 2004
- 12) 山田卓司, 佃洋一, 山本貴士, 国枝稔, 宮川豊章: 表面被覆工法の付着劣化試験の適用に関する研究, 日本材料学会, Vol.62, No.8, pp.524-530, 2013.8
- 13) 全国マスティック事業協同組合連合会, “マスティック塗材 A・C 仕様書”, マスティック塗材 A/C ローラ工法, 2018.7, <https://www.mastic.or.jp/wp-content/uploads/2016/05/20160629180703.pdf>, (参照 2023.0110)
- 14) 建築研究所, “2.外装塗仕上げ”, <https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/data/145/2.pdf> (参照 2023.0110)