

4. 透気試験複合法による中性化速度評価のためのアタッチメントの開発と 評価式における信頼区間の検討

Development of Attachment and Examination of Confidence Interval in Evaluation Formula for Evaluating Carbonation Rate by a Combined Method of Air-permeability Tests

加藤 猛*¹ 山崎 順二*¹

要 旨

透気試験複合法による中性化速度評価のために、仕上材の凹凸に追従できるアタッチメントの開発と中性化速度の評価式における信頼区間について検討した。その結果、アタッチメントを用いることで、複層塗材 E のように凹凸が大きい場合でも、わずかに漏気の影響はあるが、仕上材の透気性を概ね評価できることがわかった。透気試験複合法による透気抵抗と中性化速度係数との回帰線を中性化速度の評価式として用い、その評価式におけるばらつきを 90%信頼区間により範囲を定めた。さらに、耐用年数を安全側に評価することを検討した結果、評価式に対する 90%信頼区間の上限式を採用するとよいと考える。

キーワード：透気試験複合法／中性化速度／アタッチメント／信頼区間

1. はじめに

鉄筋コンクリート建築物に必要とされる耐久性能としてかぶりコンクリートの品質の重要性は一般に知られている。鉄筋コンクリート建築物は複数の施工プロセスを踏むため、施工プロセスにより耐久性能が左右されることや、竣工後も、静置される環境によってコンクリートの耐久性能が異なってくる。そのため、耐久性能を原位置で評価することが重要である。耐久性能を評価するうえで、建築物が海岸部や酸性土壌、凍結融解の作用を受けるなどの特殊な環境下でない限り、主に中性化の進行が判断材料のひとつとなる。

透気試験はかぶりコンクリートにおける粗密の程度を非・微破壊かつ原位置で評価する方法として用いられており、コンクリートの中性化深さと良好な相関がみられることが報告^{例えば 1,2)}されている。さらに、土木構造物では、かぶりコンクリートの施工中の品質確認のための評価試験として適用³⁾されるようになってきた。以上のように、透気試験により構造体の耐久性能を評価することが期待される。透気試験による中性化速度の評価を建築物に適用する際、多くの場合、仕上材が施されている。仕上材は中性化抑制効果があり⁴⁾、種類は多岐にわたるが仕上材の種類によって中性化抑制効果は異なり、また同一の種類であっても施工方法、環境条件、経過年数等によっても異なると考えられる。そのため、仕上材についても原位置で評価することが重要である。さらに、仕上材を有するコンクリートの中性化評価を行う上で仕上材の中性化

抵抗性とかぶりコンクリートの中性化抵抗性の両者をそれぞれ適切に評価する必要がある。

仕上面において表面減圧法による透気試験を実施する際、試験面に接地する従来品のシリコンリングは、平滑なコンクリート面を対象とした硬度のため、仕上材の凹凸に追従することができず、シリコンリングと仕上材の間からの漏気により、測定不可もしくは、透気係数が大きく（中性化抵抗性が小さく）評価される。そのため、仕上材の凹凸に追従し、漏気の影響を小さく試験することを目的として、シリコンリングより硬度の低い材料でアタッチメントを作製した。加えて、アタッチメントの使用が試験結果に及ぼす影響の検討や凹凸面に対する漏気量を確認することで、アタッチメントの有用性を示す。

また、透気試験複合法によって得られた透気抵抗と中性化速度係数との回帰線による評価式のサンプル数を増やすこと目的に、既往の文献に加え、試験体を作製した。さらに、中性化速度の評価式におけるばらつきについて、統計的手法で信頼区間を設定し、その範囲を定めた。

2. 実験概要

2.1 透気試験複合法の概念

透気試験複合法には、図-1、図-2 に示すダブルチャンバー法およびドリル削孔法を用いている。透気試験複合法の概念図を図-3 に示す。通常ダブルチャンバー法は、図-1 にあるように、表面からコンクリートの空気透過性を評価しているが、図-3 のように仕上材が施されている

*¹ 技術研究所建築材料研究グループ

場合、試験結果は仕上材の透気性の要因が大きい⁵⁾ため、本評価手法では主に仕上材の中性化抵抗性を評価するものとする。

ドリル削孔法は比較的内部のコンクリートの空気透過性を反映しており、コンクリート表層に仕上材や表面含浸材などの保護材を有していても、その影響を大きく受けることなく、コンクリートの透気性を概ね評価できるといった報告がある⁶⁾。そのため、本評価手法では主にコンクリートの中性化抵抗性を評価するものとする。上記の2つの透気試験を複合させることによって仕上材を有するコンクリートの中性化速度の評価を実施する。

2.2 アタッチメントの開発

ダブルチャンバー法は基より、コンクリートを対象としているため、写真-1に示される従来品のシリコンリングの硬度はショア A 20°であり、仕上材の粗面に追従できない。このことから、仕上材の粗面用に硬度の低いアタッチメントを作製した。アタッチメントの概要とアタッチメントを使用したことによる影響を検討した実験概要を以下に示す。

(1) アタッチメントの材料

アタッチメントの性能として、素材自体が空気を通さないこと、対象物への密着性が高いこと、復元性が高いことが必要であると考えられる。そこで、アタッチメントの材料として、写真-2に示す独泡スポンジと写真-3に示すウレタン樹脂をアタッチメントとして用いた。

独泡スポンジは、アスカ-C 25°の柔らかい材質であり、独立の気泡を形成することで、非吸水性、断熱性を有し、サッシの目地材や工業用のパッキン等にも用いられる。独泡スポンジによるアタッチメントの構成として、図-4に示されるように、ショア A40°のシリコンを土台とし厚さ 50mm の独泡スポンジを接着させている。

ウレタン樹脂はアスカ-C 7°と非常に軟質（人肌くらい）であり、追従性に優れている樹脂を用いた。ウレタン樹脂によるアタッチメントの構成として、図-5に示されるように、内部、外部チャンバー部に穴の開いた円形の亚克力板に、シリコンリングと同一の位置で、高さ約 70mm の半楕円形に成形したウレタン樹脂を接着させている。

(2) アタッチメントの使用が透気係数に及ぼす影響

透気係数の算出には内部チャンバーの体積の要因がある。アタッチメントを用いると、内部チャンバーの体積変化があるため、透気係数の算出に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、図-6に示す、NDIS 3436-5の校正器

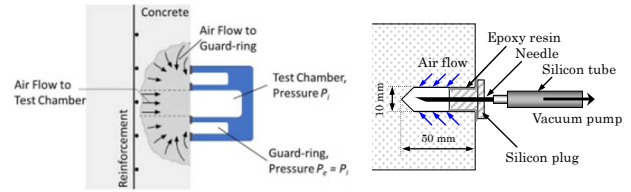


図-1 ダブルチャンバー法

図-2 ドリル削孔法

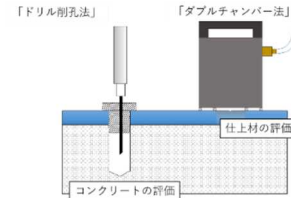


図-3 評価法の概念図

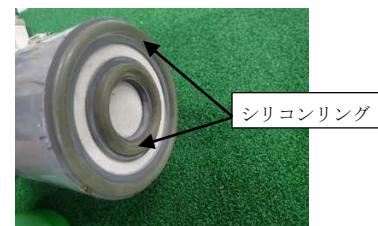


写真-1 ダブルチャンバー法のシリコンリング



写真-2 独泡スポンジ



写真-3 ウレタン樹脂

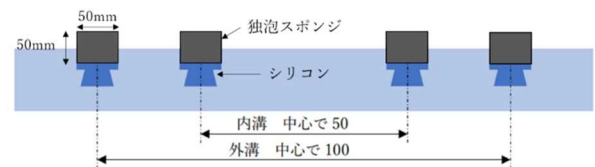


図-4 独泡スポンジの構成

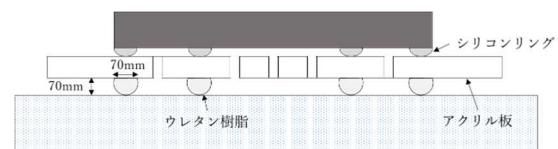


図-5 ウレタン樹脂の構成

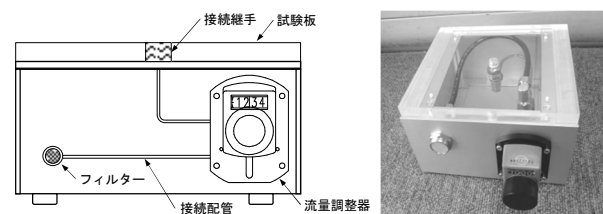


図-6 単位時間あたりの空気の流量を制御できる校正器

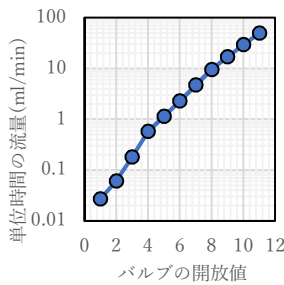


図-7 バルブの開放値と単位時間の流量

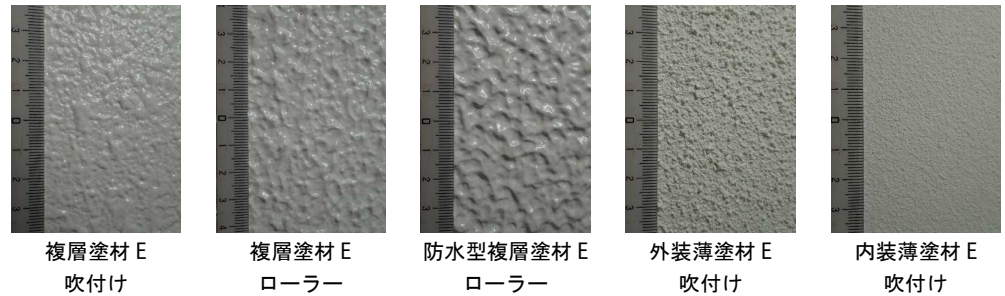


写真-4 仕上材

表-1 実験概要

		シリーズ 1 ⁷⁾	シリーズ 2 ^{8)・1)}	シリーズ 3 ⁹⁾	シリーズ 4
試験体概要	仕上材	複層塗材 E エマルジョンペイント 外装薄塗材 E	複層塗材 E エマルジョンペイント 外装薄塗材 E	複層塗材 E エマルジョンペイント 外装薄塗材 E	複層塗材 E 防水型複層塗材 E 外装薄塗材 E 内装薄塗材 E
	寸法	H200×W200×D200mm	H150×W200×D150mm	H900×W1800×D200mm	H300×W300×D200mm
	養生方法	3日間封緘養生	7日間封緘養生		
	暴露箇所	恒温恒湿室(20°C, 60%R.H.)	屋内(ただし、屋外と同じ気温下)		
測定時の材齢		20 週	52 週	2.5 年	26 週

*1 論文中の測定材齢は 7 週であるが、この検討では材齢が 52 週経過後の測定結果を用いている。

表-2 計画調査

	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
			W	C	S1	S2	G	Ad1	Ad2	Ad3
シリーズ 1	100	54.5	200	200	973	—	835	2.00	—	—
	60	48.8	180	300	857	—	922	3.90	—	—
	30	46.8	175	583	720	—	840	7.00	—	—
シリーズ 2	66.7	46.6	180	270	427	412	990	3.24	—	—
	57	49.9	180	316	447	434	909	—	2.94	—
	50	48.3	180	360	426	409	920	—	2.92	—
シリーズ 3	85	47.8	180	210	442	424	974	2.40	—	40
	54	49.2	180	333	436	424	915	—	2.90	—
	47	47.3	180	383	410	398	925	—	2.99	—
	40	44.9	180	450	378	365	936	—	3.51	—
シリーズ 4	68	48.4	170	250	909	—	979	2.5	2.50	—
	54	48.8	170	315	888	—	944	2.36	2.36	—
	40	44.6	170	425	772	—	968	2.89	2.89	—

(単位時間あたりの空気の流量を制御できる精密ニードルバルブ) に対して、シリコンリング、独泡スポンジおよびウレタン樹脂を用いて透気試験を実施し、その影響を検討した。用いた校正器のバルブ開放値と単位時間の流量の関係を図-7 に示す。

(3) アタッチメントを用いた時の漏気確認

透気試験時の仕上材の粗面に対する漏気確認として、不透過性であるアクリル板に写真-4 に示す仕上材と塗布方法で施し、透気試験を実施した。アクリル板の寸法は 300×400×5 (厚さ) mm であり、1 つの仕上材に対して 6 点測定し、透気試験開始時から内部チャンバーでの気圧の経時変化を記録している。仕上材が透気性のある材料であったとしても、基盤が透気性のないアクリル板を用いているため、透気試験時における圧力変化はほとんどないものとする。このため内部チャンバーにおける気

圧の変化量はアタッチメントが仕上材の粗面に追従できずに漏気した量と考える。

2.3 中性化速度の評価式および信頼区間の検討

試験体の概要、透気試験時の材齢を表-1 に示す。シリーズ 1⁷⁾、2⁸⁾は既往の文献の実験結果を参考に、シリーズ 3⁹⁾は既往の文献で用いた試験面とは反対面に、2 分割して仕上材を施しており、その面での試験結果を用いている。ただし、シリーズ 1 の既往の文献中には仕上材に薄付けモルタル (5mm 程度) が含まれていたが、セメント系と非セメント系の仕上材ではコンクリートの中性化進行過程が異なると考えられるため除外している。また、シリーズ 2 の既往の文献中の試験結果は、コンクリートの材齢が 7 週と比較的若材齢での結果であることから、透気試験結果 (特にドリル削孔法) に水分の影響があると考えられるため、材齢が 52 週経過した時の結果を用いている。

シリーズ4はサンプルの数を増やすことを目的として、新たに試験体を作製した。内装薄塗材Eは外装薄塗材Eで使用される骨材よりも粒度が細かいタイプのアクリルリシンであり、写真-4に示されるように外装塗材Eと比べると表面の凹凸が少ない。いずれの試験体も2面乾燥状態（H×W面）であり、仕上材の塗布面は1面、それ以外の面はアルミテープでシールしている。促進中性化は試験体寸法 100×100×400mm で試験に用いる試験体と同一の養生方法、暴露環境であり、同一種類の仕上材を施した試験体に対し、JISA1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準じて行った。

コンクリートの調合、使用材料を表-2、表-3に示す。W/C=30～100%であり、シリーズ2～4はレディーミクストコンクリート工場で練り混ぜられたコンクリートである。

3. 実験結果

3.1 アタッチメントの開発

(1) アタッチメントの使用（体積の変化）が透気係数に及ぼす影響

アタッチメントとして作製した独泡スポンジおよびウレタン樹脂自体の漏気確認としてアクリル板で測定した結果を図-8に示す。図は内部チャンバーの気圧の経時変化と透気係数を示している。ダブルチャンバー法は、試験開始から60秒間は気圧を制御しながら吸引し、透気係数を計測する時の初期気圧（試験開始から60秒後時点での気圧）が30～50mbarになるようにしている。図-8より独泡スポンジおよびウレタン樹脂において、従来品のシリコンリングと概ね同様に初期気圧が約30mbarであり、気圧の経時変化がほとんどないことがわかる。透気係数 KT でも0もしくは $0.0001 \times 10^{-16} \text{m}^2$ と非常に小さい値であることから独泡スポンジおよびウレタン樹脂で測定することによる漏気はほとんどないと考えられる。

図-6に示す、単位時間あたりの空気の流量を制御できるダブルチャンバー法の校正器に対して、シリコンリング、独泡スポンジおよびウレタン樹脂を用いて透気試験を実施した結果を図-9に示す。いずれの材料を用いても、単位時間あたりの流量に対する透気係数の値は良く一致していることから、独泡スポンジおよびウレタン樹脂のアタッチメントを用いることでの体積変化（内部チャン

表-3 使用材料

	使用材料	物性
シリーズ1	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 陸砂 (表乾密度 2.58g/cm ³)
	粗骨材	G 碎石 (表乾密度 2.65g/cm ³)
	混和剤	Ad1 AE 減水剤
シリーズ2	セメント	C 普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm ³)
	細骨材	S1 砕砂 (表乾密度 2.66g/cm ³)
	粗骨材	S2 山砂 (表乾密度 2.57g/cm ³)
	粗骨材	G 碎石 (表乾密度 2.69g/cm ³)
	混和剤	Ad1 AE 減水剤
シリーズ3	セメント	C 普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm ³)
	細骨材	S1 砕砂 (表乾密度 2.66g/cm ³)
	粗骨材	S2 山砂 (表乾密度 2.57g/cm ³)
	粗骨材	G 碎石 (表乾密度 2.69g/cm ³)
	混和剤	Ad1 AE 減水剤
	混和剤	Ad2 高性能 AE 減水剤
シリーズ4	セメント	C 普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm ³)
	細骨材	S1 砕砂 (表乾密度 2.66g/cm ³)
	粗骨材	G 碎石 (表乾密度 2.69g/cm ³)
	混和剤	Ad1 AE 減水剤 (標準型)
	混和剤	Ad2 AE 減水剤 (遅延型)
	混和剤	Ad3 碎石粉 (表乾密度 2.70g/cm ³)

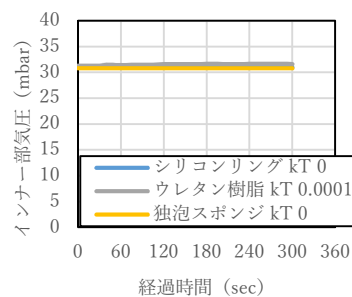


図-8 アクリル板に対する測定結果

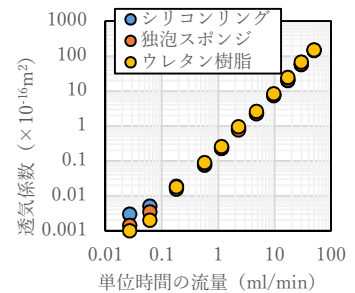


図-9 校正器による測定結果

バーの体積）が透気係数に及ぼす影響は極めて小さいものとする。透気係数が $0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下の領域で単位時間あたりの流量に対する透気係数は異なる値が示されているが、既往の研究¹⁰⁾の中で校正器に対して、単一のダブルチャンバー法を用いて10回連続測定した結果においても、 $0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 付近での透気係数に変動が大きいことが示されている。これは、透気係数 $0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下となるような小さい範囲では、微小な気圧変化量でも透気係数の値に違いを生じさせることが要因としてあり、またそれはダブルチャンバー法が元来持つ特性である。そのため、透気係数が $0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下の領域で独泡スポンジおよびウレタン樹脂を用いたことによる単位時間あたりの流量に対する透気係数の違いは許容差であると考えられる。

(2) アタッチメントを用いた時の漏気確認

写真-4の仕上材に対して、独泡スポンジおよびウレタン樹脂を用いて6点測定した結果を図-10および図-11に示す。凡例の数字が透気係数であり、四角内の数字が6点

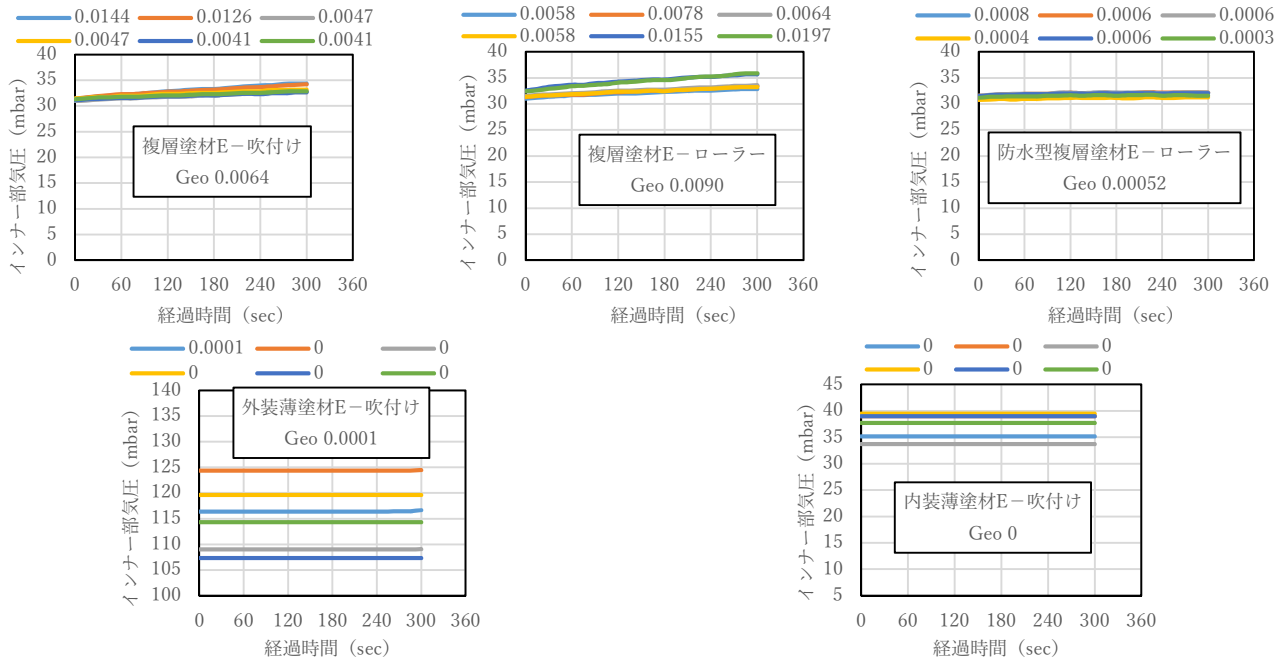


図-10 仕上面に対して独泡スポンジを用いた測定結果

測定した結果の相乗平均値である。図-10より、独泡スポンジによる測定では、複層塗材Eの吹付けで最大3mbar、ローラーで最大3.5mbarの気圧上昇が認められるが、ダブルチャンバー法の試験前に実施するキャリブレーションの上限値5mbar以下であることが確認できる。防水型複層塗材Eは複層塗材Eと比べると気圧上昇値は小さく、最大で0.7mbarである。防水型複層塗材Eの主材はアクリルゴム系の弾性があるものであるため、吸引時に仕上材に作用する力がより独泡スポンジと密着させ、漏気が低減できたと考えられる。外装薄塗材Eは気圧の経時変化がなく、漏気していないと考えられるが、初期気圧が100mbar程度に大きく、30～50mbarまで減圧できていないことがわかる。ダブルチャンバー法の開発者であるトレント氏が執筆した本¹¹⁾の中で以下の2点の理由から内部チャンバーにおける初期気圧および測定時の気圧が大きくなりすぎないように制御している。

①測定中に試験面から離れ、落下し故障する(落下に対する安全装置として内部チャンバーの気圧が200mbarを超えると復圧過程を終了し、常に吸引状態となる)。②透気係数の式の導出に内部チャンバーの気圧が大気圧より非常に小さいことを仮定している。このような理由から、独泡スポンジを用いて外装薄塗材Eを測定することは避けた方がよいと考える。しかし、同書で偶発的に初期気圧が高くなる場合でも必ずしも間違った透気係数 kT を示しているわけではないとも示している。内装薄塗材Eの気圧変化はなく、写真-4にあるように、仕上材の粗面の凹凸が少なかった

ため、漏気しなかったと考える。

複層塗材Eのように凹凸が大きい仕上材には漏気が認められるが、①気圧変化量がキャリブレーションの上限値5mbar以下であること、②透気係数の相乗平均値は約 $0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 未満に小さく、また透気性を評価するうえで安全側(透気係数が大きくなる側)に評価していることを考慮すると、仕上面において独泡スポンジを用いることでの透気試験はわずかに漏気の影響はあるが、仕上材の透気性を概ね評価できると考える。一方、100年単位で超長期に耐用年数を評価する際、より精度の高い評価が求められることが考えられる。その場合、透気試験結果から漏気の影響を除くため、本実験で得られた気圧上昇値を差し引いて補正し、評価するとよいと考える。

図-11より、ウレタン樹脂による測定結果は、独泡スポンジと概ね同様の結果を示している。外装薄塗材Eの初期気圧に関して、独泡スポンジでは100mbar程度までしか減圧できなかったが、ウレタン樹脂では30～35mbar減圧できていることが確認できる。写真-5は新設の複層塗材Eに対して、ウレタン樹脂のアタッチメントを用いて測定した後の写真であるが、ウレタン樹脂に付着していた汚れが新設の複層塗材Eに付着している様子が伺える(外装薄塗材Eでは汚れの付着がほとんどみられない)。ウレタン樹脂においても複層塗材Eのように粗面の凹凸が大きい仕上材の場合には漏気の影響はわずかにあるが、仕上材の透気性を概ね評価できると考える。

図-10、図-11の結果から各種仕上材における内部チャ

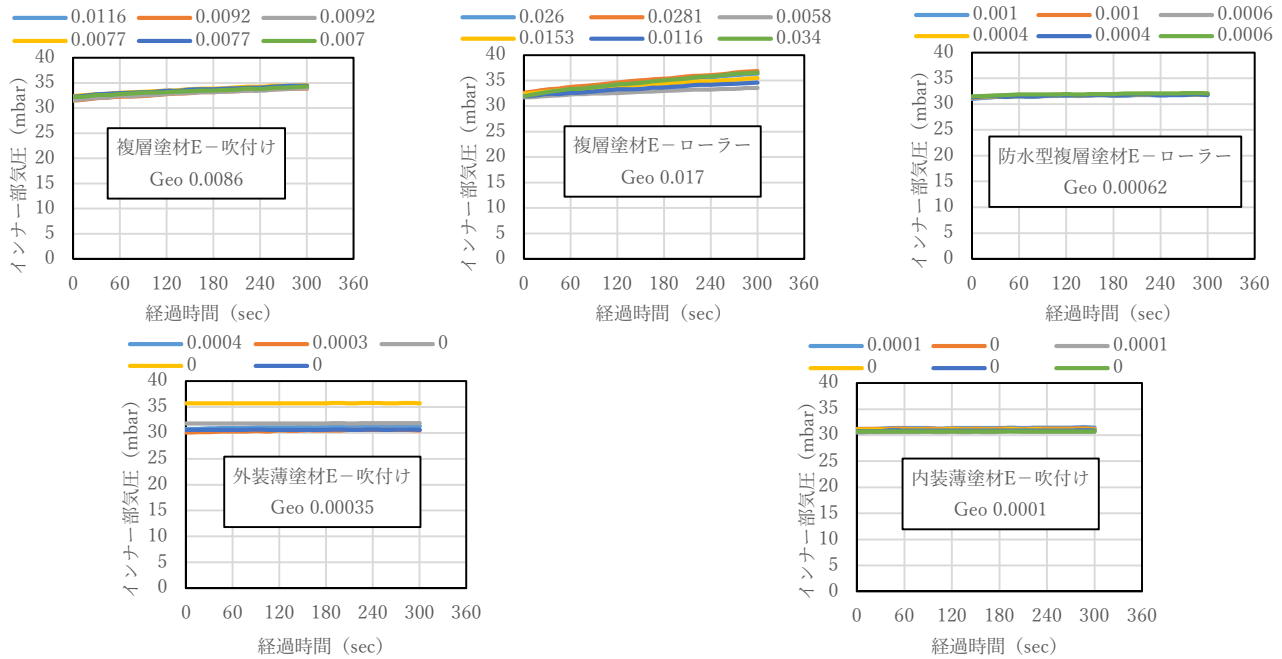


図-11 仕上面に対してウレタン樹脂を用いた結果



写真-5 汚れの付着状況

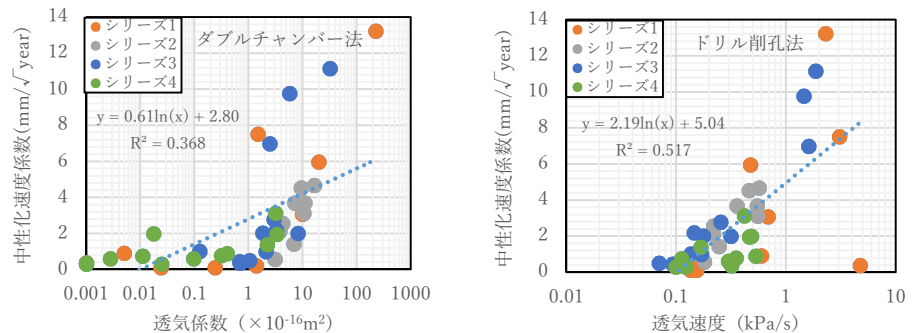


図-12 ダブルチャンバー法（左図）およびドリル削孔法（右図）の測定結果と中性化速度係数との関係

ンバーの気圧の経時変化は独泡スポンジとウレタン樹脂で概ね同様の傾向を示していることから、アタッチメントの違いが透気係数に及ぼす影響は少ないことが考えられる。しかし、上記にあるように、独泡スポンジで外装塗材 E を測定する場合、初期気圧が 30～50mbar まで減圧しないこと、ウレタン樹脂で複層塗材 E を測定する場合、ウレタン樹脂自身の汚れが複層塗材 E に付着するといった特徴がある。この特徴を鑑み、測定の対象となる仕上材に応じて、アタッチメントを選定するとよいと考える。

3.2 中性化速度の評価式および信頼区間の検討

(1) 透気試験結果と中性化速度係数との関係

ダブルチャンバー法およびドリル削孔法により得られた透気係数および透気速度と中性化速度係数の関係について図-12 に示す。ダブルチャンバー法とドリル削孔法の両者とも透気係数および透気速度が大きくなるにつれて中性化速度係数が大きくなる傾向を示すものの、透気係

数および透気速度と中性化速度係数との相関は必ずしも高くない。仕上材付きコンクリートの場合、透気係数および透気速度と中性化速度係数の間には定性的な対応はあるが、両者の方法においておおよそ $0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ または 0.1kPa/s を起点として透気係数および透気速度が大きくなるほど回帰線から広く分布している。これは、ダブルチャンバー法は仕上材が中性化速度に及ぼす影響を主に評価しているが、かぶりコンクリートの中性化速度の評価は難しく、またドリル削孔法ではかぶりコンクリートの中性化速度の評価は可能であるが、仕上材が中性化速度に及ぼす影響については評価が困難であるためと考えられる。透気試験機単体で仕上材付きコンクリートの中性化進行を精度よく予測するに至らないことがわかる。

(2) 中性化速度の評価式の検討

「a) 透気試験結果と中性化速度係数との関係」の結果より、透気試験機単体では仕上材付きコンクリートの中性

化速度を精度よく予測するに至らないことがわかった。そこで、ダブルチャンバー法とドリル削孔法を複合させる手法を検討し、その手法を用いて中性化評価を試みた。

測定結果を複合させる方法として、各測定結果をそのままの値、対数、もしくは逆数にして、さらにその各値に対して任意の係数をかけて四則演算した。そのようにして得られた値と中性化速度係数との決定係数 R^2 が大きくなる式を探した。その結果、式(1)に示されるように、透気係数から得られる透気抵抗性 $1/kT$ と透気速度から得られる透気抵抗性 $1/PV$ に対する指数の乗数に重みづけ係数をつけた和である透気抵抗 R が得られた。なお、逆数の和の式や重みづけの係数 $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 2$ は本実験におけるデータの最適値であり、サンプル数が増えると式もしくは重みづけの値が変化することがあると考える。

$$R = \left(\frac{1}{kT}\right)^{\alpha} + \left(\frac{1}{PV}\right)^{\beta} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

- R : 透気抵抗 [—]
- kT : 透気係数 [$\times 10^{-16} \text{m}^2$]
- PV : 透気速度 [kPa/s]
- α, β : 重みづけ係数 ($\alpha = 0.5, \beta = 2$) [—]

透気抵抗 R と中性化速度係数の関係を図-13 に示す。透気抵抗が大きくなるにつれて中性化速度係数が小さくなる傾向があり、両者の間には $R^2=0.757$ の高い相関関係にあった。図-12 の透気試験単体での中性化速度の評価と図-13 の透気試験複合法での中性化速度の評価を比較すると複合法により仕上材とかぶりコンクリートを総合的に評価したための結果と考える。以上のことからダブルチャンバー法とドリル削孔法の透気抵抗性を複合して算出された透気抵抗 R によって仕上材付きコンクリートの中性化速度を精度良く評価しているものと考えられる。

(3) 中性化速度の評価式における信頼区間の検討

仕上材を有するコンクリートの中性化速度の評価式(2)として、図-13 に示す透気抵抗 R と中性化速度係数 A の回帰線を用いることとした。

$$A = -1.68 \ln(R) + 7.02 \quad \dots\dots\dots (2)$$

また、評価式のばらつきの検討として、図-13 の透気抵抗 R と中性化速度係数 A の回帰線に対する 90%信頼区間と実測値に対する 90%予想区間を図-14 に示す。図より 90%信頼区間における上限、下限の式は非線形であるが、線形回帰した直線（上限式：黄色の点線、下限式：緑色の点線）と近似しているため、線形回帰した直線を 90%信頼区間における上限、下限の式とすると、評価式 $A = -1.68 \ln(R) + 7.02$ に対する 90%信頼区間は上限式 $A = -1.72 \ln$

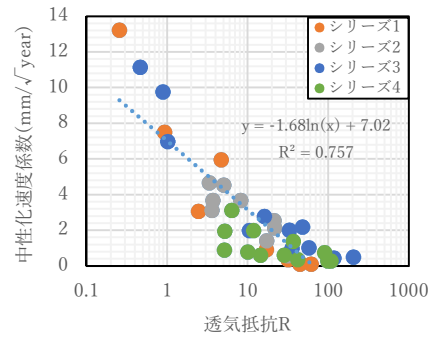


図-13 透気抵抗と中性化速度係数の関係

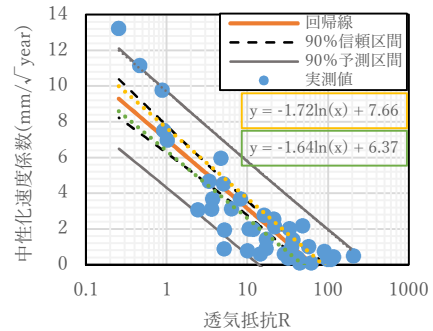


図-14 評価式の信頼区間および予想区間

表-4 各耐用年数における中性化速度係数と透気抵抗

耐用年数	30 年	65 年	100 年
中性化速度係数 A(mm/√year)	7.30	4.96	4.00
透気抵抗 R	0.84	3.41	6.05

表-5 透気抵抗 R のマトリックス

$R = \left(\frac{1}{kT}\right)^{0.5} + \left(\frac{1}{PV}\right)^2$		$kT (\times 10^{-16} \text{m}^2)$						
		0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000
PV (kPa/s)	100	31.62	10.00	3.16	1.00	0.32	0.10	0.03
	10	31.63	10.01	3.17	1.01	0.33	0.11	0.04
	1	32.62	11.00	4.16	2.00	1.32	1.10	1.03
	0.1	132	110	103	101	100	100	100
	0.01	10032	10010	10003	10001	10000	10000	10000

(R)+7.66, 下限式 $A = -1.64 \ln(R) + 6.37$ である。

(4) 耐用年数の評価区分の検討

中性化速度と透気性の関連性に基づく耐用年数評価区分が設定できれば、ダブルチャンバー法（透気係数）とドリル削孔法（透気速度）の測定結果から耐用年数を簡易に評価する手法が構築できる。JASS 5¹²⁾で検討された計画供用期間の級である「短期：30 年」、「標準：65 年」、「長期：100 年」の年数で中性化深さが一般的ななかぶり厚さである 40mm に到達すると仮定して $\sqrt{t}$ 則により求めた中性化速度係数 A と、ここで得られた中性化速度係数 A を用いて式(2)より導出した透気抵抗 R を表-4 に示す。式(1)の透気抵抗 R を、透気係数 kT と透気速度 PV のマトリックスで示した例を表-5 に示す。さらに、表-5 を細分化し、x 軸

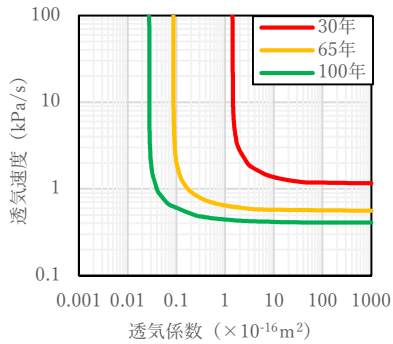
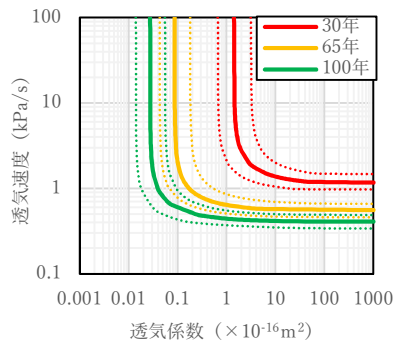
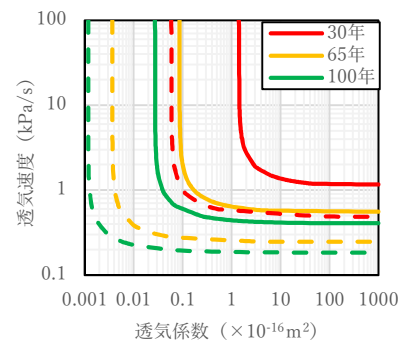
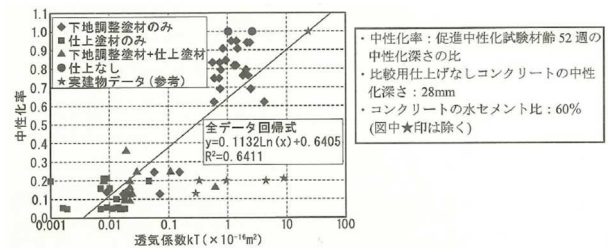


図-15 耐用年数評価チャート


 図-16 90%信頼区間における
耐用年数評価チャート

 図-17 90%予想区間上限における
耐用年数評価チャート

をダブルチャンバー法の透気係数 kT 、 y 軸をドリル削孔法の透気速度 PV とした耐用年数評価チャートを図-15に示す。図-15中の30、65および100年の線は表-4の耐用年数の透気抵抗 R を連続的に表現したものである。また、各耐用年数の透気抵抗 R の閾値を境界線とすることで、中性化の進行に基づく耐用年数評価区分が設定できる。図-15により、ダブルチャンバー法による透気係数 kT とドリル削孔法による透気速度 PV の測定結果が分布する位置が仕上材付きコンクリートの耐用年数を評価するための指標になると考える。

図-15の耐用年数評価チャートにおいても評価式のばらつきを考慮するため、「c) 中性化速度の評価式における信頼区間と適用範囲」により式(4)の90%信頼区間を近似的に求めた結果を用いる。この90%信頼区間の上限式 $A = -1.72 \ln(R) + 7.66$ 、下限式 $A = -1.64 \ln(R) + 6.37$ を図-15の耐用年数評価チャートに点線で反映させた結果が図-16である。今後、本評価式の適用範囲内でデータを蓄積しても、おおよそ点線内に各耐用年数における境界線が位置することが考えられる。加えて、安全側に評価することを目的に、90%予想区間の上限式 $A = -1.69 \ln(R) + 9.70$ から得られた各耐用年数における透気抵抗 R を連続的に示した(点線の境界線)結果を図-17に示す。図より、安全側に評価した場合、 x 軸の透気係数に着目すると90%予想区間の上限式と評価式には1オーダーほどの差があることがわかる。安全側に評価した時の境界線について、「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・解説」¹³⁾の中で、透気試験により仕上材の中性化抵抗性を評価することを目的に透気係数と中性化率との関係¹⁴⁾が図-18のように示されている。図-18から、透気係数 $0.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ に対する中性化率は0.35程度であり、仕上材の中性化抵抗性が高いことがわかる。一方、図-17では、透気係数 $0.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ に対して耐用年数が30年程度、中性化速度係数では $7.30 \text{mm}/\sqrt{\text{year}}$ となり図-18中の比較用仕上げなしコ


 図-18 透気係数と中性化率¹⁴⁾

ンクリートの中性化速度係数 $8.85 \text{mm}/\sqrt{\text{year}}$ (促進52週で28mmの中性化深さより算出)と近い値である。当然、基材コンクリートの種類(W/C、養生方法、静置環境等)の違いがあるため、単純な比較はすべきではないが、参考値とすると、90%予想区間の上限式を用いて各耐用年数における境界線を設定、つまり安全側の評価で設定すると過少に中性化速度を評価していると考ええる。そのため、安全側の評価をする場合、評価式のばらつきを考慮した90%信頼区間の上限式 $A = -1.72 \ln(R) + 7.66$ を採用するとういことを考える。

4. まとめ

透気試験複合法による中性化速度評価のために、仕上材の凹凸に追従できるアタッチメントの開発と中性化速度の評価式における信頼区間について検討した結果を以下に示す。

(1) アタッチメントの開発について、アタッチメントを用いることで、複層塗材Eのように凹凸が大きい場合でも、わずかに漏気の影響はあるが、仕上材の透気性を概ね評価できることがわかった。また、アタッチメントの使用(体積変化)が透気係数に及ぼす影響を検討した結果、アタッチメントを用いても、体積変化が透気係数に及ぼす影響は小さく、従来品であるシリコンリングと同様な透気係数が得られた。

(2) 透気試験複合法による透気抵抗と中性化速度係数と

の回帰線を中性化速度の評価式として用い、その評価式におけるばらつきを 90%信頼区間で範囲を定めた。さらに耐用年数評価チャートを用いて、耐用年数を安全側に評価するため、実測値に対する 90%予想区間の上限式を用いると、過少に中性化速度を評価していることがわかった。そのため、安全側の評価をする場合、評価式に対する 90%信頼区間の上限式を採用するとよいと考える。

【参考文献】

- 1) 田中章夫, 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, Vol.78, No.691 pp.1539-1545, 2013.9
- 2) 野中英, 湯浅昇: 簡易透気試験方法による構造体コンクリートの中性化抵抗性評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.711, pp.727-734, 2015.5
- 3) 国土交通省 東北地方整備局: コンクリート構造物の品質確保の手引き(案)(橋脚, 橋台, 函渠, 擁壁編), 2015.12
- 4) 建設大臣官房技術調査室監修, (財)国土開発技術センター建築物耐久性向上普及委員会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術, 技報堂出版, 1986.6
- 5) 加藤猛, 今本啓一, 清原千鶴, 山崎順二: 仕上材を有するコンクリートの透気性評価に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.39, No.1, pp.595-600, 2017
- 6) 下澤和幸, 本庄敬祐, 山崎順二, 今本啓一: 塗仕上げを施した鉄筋コンクリート造建築物のかぶりコンクリートの性能評価方法に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.35, No.1, pp.2019-2024, 2016
- 7) 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に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.40, No.1, pp.561-566, 2018
- 8) 下澤和幸, 清原千鶴, 本庄敬祐, 山崎順二, 今本啓一, 田中章夫: 表層透気性によるコンクリートの品質評価に関する研究—その 2. 小型試験体の透気性—, 日本建築学会学術講演梗概集(関東), pp.361-362, 2015.9
- 9) 山崎順二, 今本啓一, 湯浅昇, 下澤和幸: 実大コンクリート壁におけるダブルチャンバー法を用いた表層透気性の評価に関する共通試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.38, No.1, pp.2013-2018, 2018
- 10) 田中章夫, 今本啓一, 山崎順二, 下澤和幸, 湯浅昇, 加藤猛: RC 造建築物に適用する透気性試験における影響要因と評価手法に関する検討 その 3.DC(TPT)および FIM 法における機差の検討, 日本建築学会学術講演梗概集(中国), pp.549-550, 2017.8
- 11) Torrent, R., Neves, R. and Imamoto, K : Concrete permeability and durability performance from theory to field applications, CRC Press, pp.172, 2022
- 12) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2022, pp.163-173, 2022
- 13) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性設計施工指針・解説, pp.166-172
- 14) 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, コンクリート工学会年次論文集, Vol.30, No.1, pp.645-650, 2008.7