

論文 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

下澤 和幸*1・本庄 敬祐*2・山崎 順二*3・今本 啓一*4

要旨: 鉄筋コンクリート造建築物には、殆どの場合コンクリート面に何らかの仕上材が施されているため、かぶりコンクリートの耐久性能を非破壊試験により評価するには、仕上材を介して試験を実施する必要がある。本研究では、ドリル削孔内の透気性と比抵抗を求め、かぶりコンクリートの耐久性能を評価するドリルPR法によって3種類の塗仕上げを施した試験体と打放し試験体を対象として基礎的な実験を行った。その結果、同手法に用いるドリル削孔法による透気試験は、塗仕上げの影響を大きく受けることなく削孔内の領域における透気性を評価できることが示唆された。

キーワード: 透気性, 比抵抗, 仕上塗材, ドリル削孔法

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の劣化や損傷の顕在化が問題視され、適切に維持管理を行うための点検や調査・診断手法の早期確立が求められている。従来から、鉄筋コンクリート構造物の耐久性を確保する観点より、鉄筋腐食を生じさせない方策として、適切な鉄筋のかぶり厚さを確保し、かぶりコンクリートを緻密化して外的因子の侵入を最小限に止めることが挙げられている。

筆者らはこれまで、かぶりコンクリート部分の耐久性能を左右する物質透過性に着目し、原位置で簡便に測定できる試験手法「ドリルPR法」¹⁾による評価方法について検討してきた。同手法は、新設および既存のRC造構造物において、躯体コンクリートに仕上げを施す前、または打放し面に適用できるものとして提案している。

しかしながら、鉄筋コンクリート造建築物には耐久性や美観の観点から仕上材が施されており、打放し仕上となる部材や部位は少ない。そこで、仕上材が施された部材や部位に対するドリルPR法の適用の可否に関して検討するため、基礎的な実験を行った。

本実験では、コンクリートの呼び強度を3水準として小型試験体ならびに壁形試験体を製作し、それぞれの試験体について3種類の塗仕上げを施したものと打放し仕上げを用意して、透気試験、比抵抗試験、促進中性化試験等に供した。このうち、ドリルPR法に用いるドリル削孔法による透気試験結果の傾向を比較することを目的として、表面法であるダブルチャンバー法(トレント法)による透気試験を併せて実施した。

本論では、各測定結果にもとづくドリルPR法の適用の可否に関して検討結果について述べる。

2. 試験方法の概要

本実験には、筆者らが検討を重ねているドリルPR法を用いた。ドリルPR法は、コンクリート表面に設けたドリル削孔において簡易透気試験および比抵抗試験を実施し、かぶりコンクリートの耐久性能を評価する手法である。以下に各試験の概要を示す。

2.1 簡易透気試験(ドリル削孔法)²⁾

図-1に示した簡易透気試験は、試験位置に設けたドリル孔(直径10mm×深さ50mm)をシリコンキャップにて密栓し、孔内をある程度の余裕をもって減圧した後、孔内部の圧力が特定の圧力に戻るまでに要する時間を計測して、式(1)によって、簡易透気速度を求める。

$$P.V. = (25.3 - 21.3) / T \quad (1)$$

ここに、P.V.は簡易透気速度(kPa/s)、Tは孔内の圧力が21.3kPaから25.3kPaへ戻るのに要する時間(s)である。なお、式(1)の圧力範囲においてT<10秒の場合には、13.3kPaから33.3kPaの範囲によって再測定を行う。

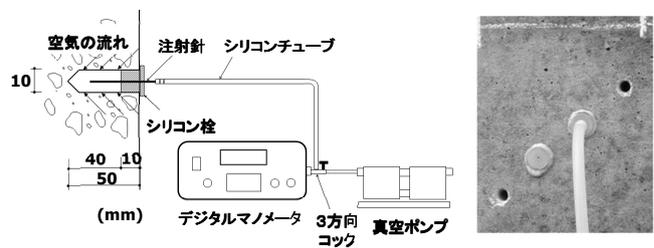


図-1 ドリル削孔法

*1 (一財) 日本建築総合試験所 構造部 耐震耐久性調査室 室長代理 博士(工学) (正会員)

*2 (一財) 日本建築総合試験所 構造部 耐震耐久性調査室

*3 (株) 浅沼組技術研究所 課長 工修 (正会員)

*4 東京理科大学 工学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

2.2 比抵抗試験（四電極法）

図-2 に示した比抵抗試験は、物理探査分野の電気探査法の一つとして F.Wenner が考案した四電極法（2つの電極間に電流を流し、これら電極間の中に置いた二電極で電位を測定し比抵抗を測る方法）を、武若・小林らがコンクリートに適用した方法³⁾に基づくものである。本試験では、比抵抗を精度良く測定することを目的に、コンクリート表面にドリル削孔を等間隔に4点設け、ステンレスブラシ電極（φ11mm）を孔内に挿入して比抵抗を求める。なお、同図に示す孔の間隔 a は 40mm とし、削孔の深さ 30mm 点での比抵抗を求める。

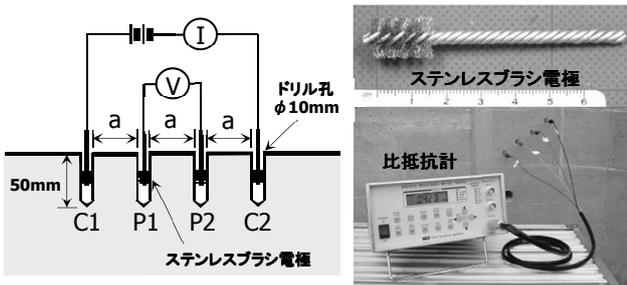


図-2 比抵抗試験

3. 実験概要

3.1 使用材料および調合と物性

本実験では、生コン工場で作られた呼び強度 18（相当）、24 および 30 の 3 水準のコンクリートを用いて試験体を製作した。

コンクリート材料には、水(W)は回収水、セメント(C)は普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³)、細骨材には山砂(S1)（城陽産、密度 2.57 g/cm³、FM2.80）と砕砂(S2)（茨木産、密度 2.66 g/cm³、FM2.80）を混合したもの、粗骨材(G)は砕石（茨木産、密度 2.69 g/cm³、実績率 58.0%）、混和剤(Ad)は AE 減水剤(AE: リグニンスルホン酸系)、または高性能 AE 減水剤 (SP: ポリカルボン酸エーテル系)を用いた。コンクリートの計画調合と物性（圧縮強度、促進中性化深さ）を表-1 に示す。

3.2 試験体と各種試験

試験体は、外形寸法 150×150×200 mmの小型試験体と H900×W1800×D200 mmの壁形試験体の 2 種類とし（写真-1 参照）、材齢 7 日目に脱型するまで型枠内にて封緘

養生とした後、材齢 4 週時点で塗仕上げを施すまでは気中養生とした。試験体には、JIS A 6909⁴⁾ に適合し、使用実績が多い外装合成樹脂エマルジョン系薄付け仕上塗材(外装薄塗材 E: アクリルリシン)、塗料(EP: 合成樹脂エマルジョンペイント)および合成樹脂エマルジョン系複層仕上塗材(複層塗材 E: アクリルタイル)の 3 種類を施した。それぞれの塗厚さは、材料種類毎の仕様に応じて、実施工に用いられる厚さとした。仕上材の塗布は、小型試験体および壁形試験体ともに側面 1 面とした。小型試験体においては、塗布面以外をアルミテープにより養生することにより、実大部材の境界条件を模擬した試験体としている。また、壁形試験体においては、図-3 に示すように側面を 2 分割して、一方には「仕上無し(打放し)」または「EP」を、他方には「外装薄塗材 E」または「複層塗材 E」をそれぞれ塗布した。なお、塗仕上げを施した試験体は、雨掛かりのない室内（屋外とほぼ同じ気温下）に静置させた。

加えて、本実験に用いた 3 水準のコンクリートの透気性を、海外では透気性試験のベンチマークとされている RILEM-CEMBUREAU 法⁵⁾（以下「RILEM 法」と記す）により確認した。RILEM 法では、各水準のコンクリートによって直径 10cm、高さ 20cm の円柱供試体を製作し、



小型試験体

壁形試験体

写真-1 コンクリート試験体

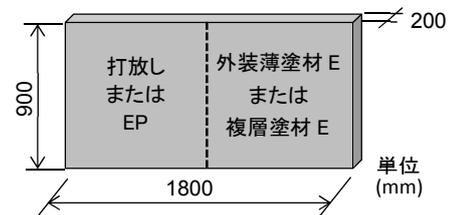


図-3 壁形試験体の塗仕上げの区分

表-1 コンクリートの計画調合と物性

記号	呼び方	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度* (N/mm ²)	促進中性化深さ** (mm)
				W	C	S1	S2	G	AE	SP				
18	(18)-15-20N	66.7	46.6	180	270	412	427	990	3.24	—	11.5	3.4	26.0	30.7
24	24-18-20N	57	49.9	180	316	434	447	909	—	2.94	18.5	5.2	30.6	26.0
30	30-18-20N	50	48.3	180	360	409	426	920	—	2.92	18.0	5.6	39.4	16.7

注) *: 標準水中養生(材齢 28 日), **: 中性化促進材齢 26W

コンクリートの打上がり面を数 cm 切断した面から厚さ 5cm となるように切出したものを供試体とした。併せて、JIS A 1153⁶⁾に従う促進中性化試験（温度 20℃、湿度 60% および CO₂ 濃度 5%）により中性化深さを求めて、呼び強度毎の品質の違いを予め確認した。

本実験では、小型および壁形試験体の材齢 4 週時に塗仕上げを施した後、小型については材齢 7 週と 56 週、壁形は材齢 28 週と 56 週の各時点において、簡易透気試験および比抵抗試験を実施した。また、透気試験結果の傾向を比較する目的で、表面法であるダブルチャンバー法（トレント法）⁷⁾による透気試験を壁形試験体において同時期に実施した。さらに、小型試験体は材齢 28 週目から養生期間 26 週の促進中性化試験（上述した方法と同じ JIS A 1153 に準拠）に供し、各塗仕上げによる中性化抑制効果について確認した。

4. 実験結果と考察

4.1 小型試験体

小型試験体の材齢 7 週と 56 週における簡易透気試験と比抵抗試験の結果を図-4.1~図-4.3 に、また 3 水準のコンクリートの透気性のベンチマークとするために実施した RILEM 法による透気試験結果を図-5 に示す。

簡易透気速度は、各呼び強度の打放し試験体（シンボル：●）の材齢 7 週時において、呼び強度 24 は 18 に比して小さくなり、呼び強度 24 と 30 はほぼ同等の値となった。次に、同材齢時の各塗仕上げを施した試験体の簡易透気速度は、いずれの呼び強度も打放し試験体との差異は小さく、呼び強度毎の比較においても打放し試験体の傾向と同じである。さらに、いずれの呼び強度も材齢が 7 週から 56 週へ増すことにより、簡易透気速度は増加している。

また、各呼び強度の透気性のベンチマークとするために実施した RILEM 法による透気係数は、呼び強度 18 と 24 はほぼ同等となり、呼び強度 30 はそれらよりも値は小さいものであった。ここで、表-1 に示した各呼び強度の品質を確認するために実施した圧縮強度試験や促進中性化試験の結果の大小関係（呼び強度 18 > 24 > 30）に基づけば、呼び強度 18 の透気係数は、予想した結果（3 水準のうち、最も大きい）と異なり、既報¹⁾における同程度の水セメント比のコンクリートと比較しても透気係数は小さい。そのため、呼び強度毎の透気性の大小を目安として、圧縮強度および促進中性化深さの大小関係を参照することとした。

次に、比抵抗はいずれの呼び強度においても 100 Ω・m 前後であり、コンクリートの材齢が増してもその値に大きな変化はみられない。これは、小型試験体は脱型の後、仕上げを施すまでの 4 週間の気中養生において、試

験体の各面からの水分の逸散が進み、コンクリート中の含水状態が安定したことによるものと考えられる。また、試験体は仕上げ塗布面以外をアルミテープにより養生しており、外気と触れる表面積（150×200 mm）が小さいこともあり、塗仕上げの有無や種類に拘わらず、材齢が増しても比抵抗が大きく変化することがなかったと考える。

加えて、小型試験体を対象として材齢 28 週目から行った促進中性化試験の結果より求めた中性化速度係数と材齢 56 週の簡易透気速度の関係を図-6 に示す。JASS 5 に示されている中性化率⁸⁾が大きめとなる EP（中性化率 0.81）や外装薄塗材 E（中性化率 1.02）、ならびに打放し

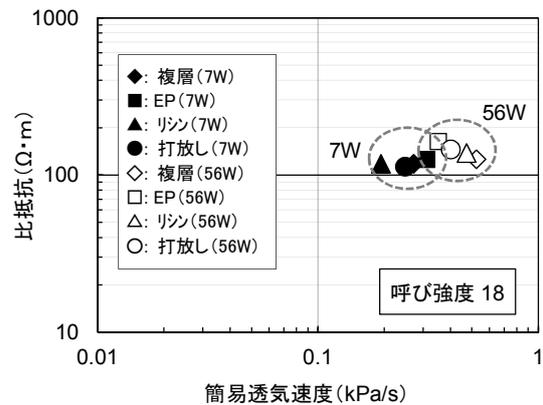


図-4.1 透気性と比抵抗の関係（呼び強度 18）

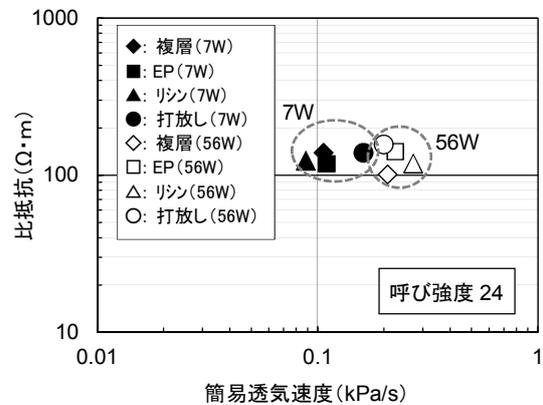


図-4.2 透気性と比抵抗の関係（呼び強度 24）

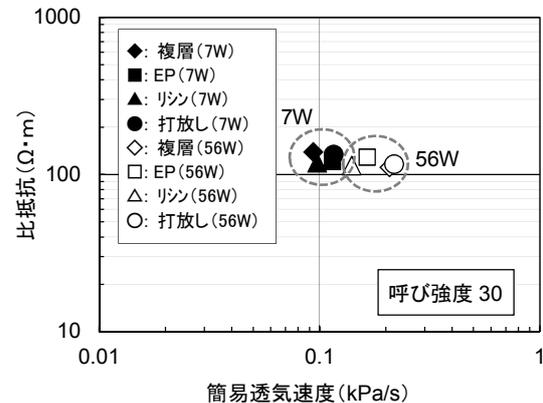


図-4.3 透気性と比抵抗の関係（呼び強度 30）

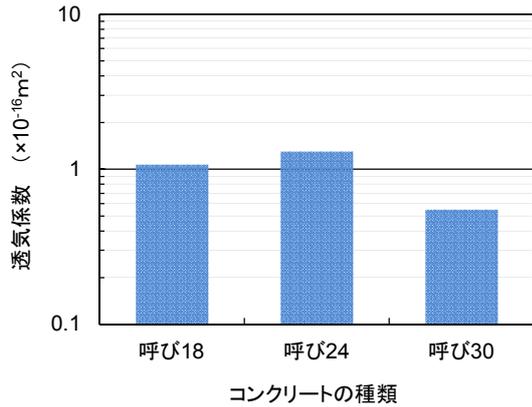


図-5 RILEM-CEMBUREAU 法の透気係数

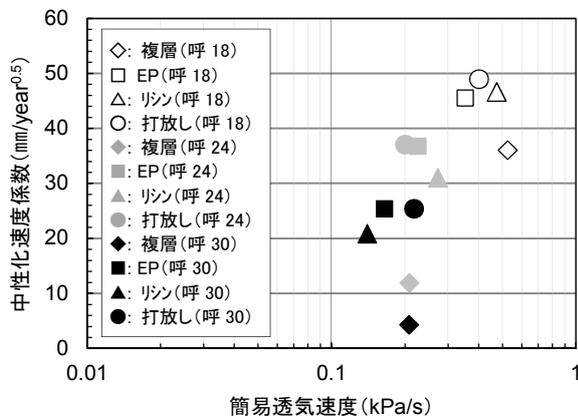


図-6 簡易透気速度 (56W) と中性化速度係数の関係

試験体においては、呼び強度が増加するに従って中性化速度係数は小さくなる傾向を示し、簡易透気速度との相関がみられる。一方、いずれの呼び強度も複層塗材 E (中性化率 0.32) は、他の塗仕上げよりも中性化速度係数は小さく、中性化進行は抑制されている。そのため、上述したとおり同塗材の簡易透気速度は打放し試験体との値の差異は小さいことから、コンクリート表面に施された塗仕上げの中性化率が小さいもの (仕上げ材の組織が緻密なもの) は、その中性化抑制効果をドリル削孔法によって評価することは難しいと考える。

4.2 壁形試験体

壁形試験体の材齢 28 週と 56 週における簡易透気試験と比抵抗試験の結果を図-7.1~図-7.3 に示した。

簡易透気速度は、各呼び強度の打放し試験体 (シンボル: ●) の材齢 28 週時において、呼び強度 18 と 24 はほぼ同等となり、呼び強度 30 は 18 や 24 よりも小さくなった。この結果の傾向は、材齢が 28 週から 56 週へ経時しても同様である。また、いずれの呼び強度においても小型試験体の傾向と同様に、材齢が 28 週から 56 週へ増すに伴い、測定値は増加している。さらに、各塗仕上げを施した試験体の材齢 28 週時における簡易透気速度は、打

放し試験体よりも小さくなるものも見られたが、材齢が 56 週に増すに伴い、いずれの呼び強度も打放し試験体との差異は小さくなる傾向を示した。ここで、コンクリートの材齢が進み、水分の逸散も安定したと考えられる材齢 56 週における小型試験体と壁形試験体の打放し試験体の簡易透気速度を比べた場合、呼び強度 18 は小型: 0.4kPa/s と壁形: 0.36kPa/s, 24 は小型: 0.2kPa/s と壁形: 0.48kPa/s, 30 は小型: 0.22kPa/s と壁形: 0.23kPa/s となり、呼び強度 18 と 30 はほぼ同等の測定値となり、呼び強度別の透気性の違いも認められた。ただし、呼び強度 24

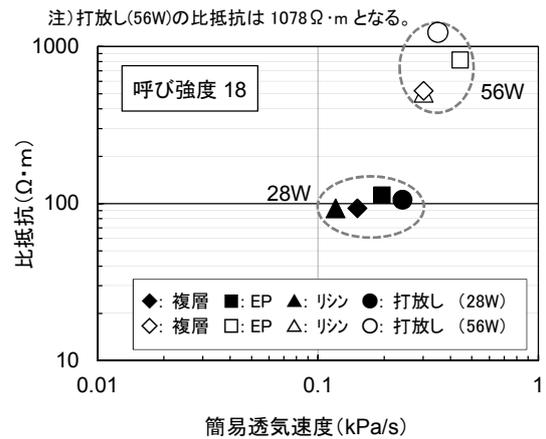


図-7.1 透気性と比抵抗の関係 (呼び強度 18)

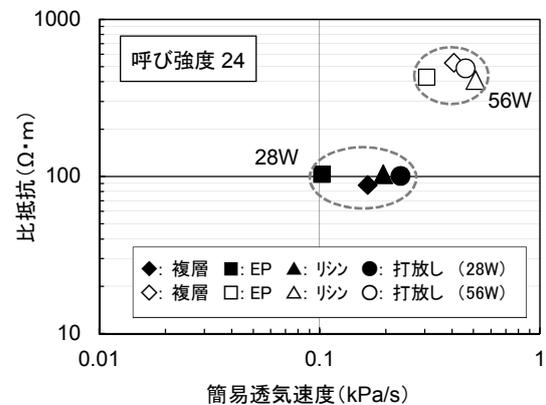


図-7.2 透気性と比抵抗の関係 (呼び強度 24)

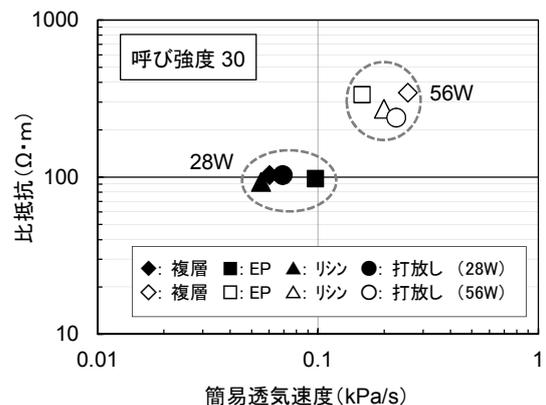


図-7.3 透気性と比抵抗の関係 (呼び強度 30)

の簡易透気速度は、小型試験体では呼び強度 30 と同等となり、壁形試験体では呼び強度 18 よりも大きくなった。呼び強度 24 の透気性は、18 と 30 の中間点に位置する結果を示すと予想していたが、異なるものとなった。この要因は、測定位置（削孔位置）でのコンクリート中の粗骨材の偏在や周囲の空隙等が係わっているものと考えているが定かではないため、今後も検討を要する。

次に、比抵抗はいずれの呼び強度においても、材齢が増すに伴い、その値は大きくなった。比抵抗は、コンクリート中の含水状態に左右されることから、壁形試験体は小型試験体のように塗布面以外をアルミテープにより養生しているわけではないため、経時によるコンクリート中の水分の逸散が大きく、値が変化したものとする。上記のとおり、経時によるコンクリート表層での含水状態の変化に伴い、いずれの呼び強度もコンクリート中の空隙内の水分移動によって空気の流れが容易となったことが一因となり、材齢が増すに伴い、簡易透気速度が大きくなったと考える。

併せて、ドリル削孔法による透気試験結果の傾向を比較することを目的として、表面法であるダブルチャンバー法(トレント法)による透気試験を同時期に実施した。

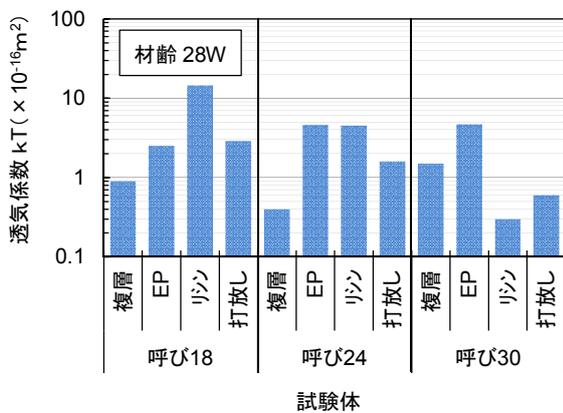


図-8.1 ダブルチャンバー法の透気係数 (材齢 28W)

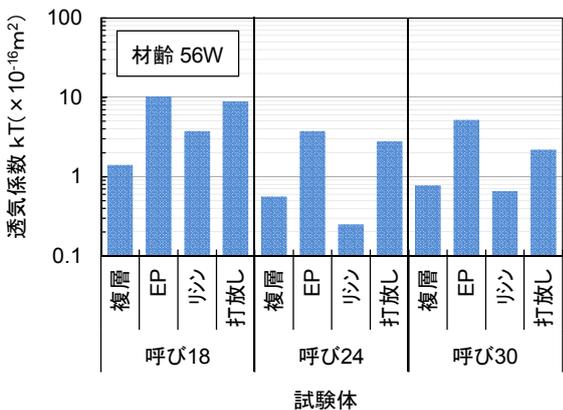


図-8.2 ダブルチャンバー法の透気係数 (材齢 56W)

その結果を図-8.1 および図-8.2 に示す。材齢 28 週と 56 週における透気係数は、打放し試験体の場合、呼び強度が増加するに従い、測定値が小さくなる傾向を示した。また、材齢が 28 週から 56 週へ増すに伴い、いずれの呼び強度においても値は増加しており、ドリル削孔法と同様の傾向である。一方、塗仕上げを施した試験体は材齢および強度が同じ打放し試験体と比較した場合、複層塗材 E 試験体は、材齢 28 週の呼び強度 30 を除き、打放し試験体よりも透気係数が小さくなる傾向を示した。これは、同材が他の塗仕上げと比べて組織が緻密であることが、表面法であるダブルチャンバー法の試験結果に影響したものとする。また、外装薄塗材 E 試験体は、打放し試験体よりも透気係数が大小しており明瞭な傾向はみられない。これは、チャンバーと塗仕上げとの接触面での凹凸や、塗仕上げが表面法による透気試験において試験結果に影響を与えるとされているコンクリートのごく表層部の粗な組織 (Skin) と類似した状態となっていたことが要因として考えられる。すなわち、表面法は仕上げ材の種類およびその有無が測定結果に与える影響は、ドリル削孔法に比べて大きいと言える。

4.3 塗仕上げ面のドリル削孔法における透気領域

本実験の範囲では、ドリル削孔法による簡易透気試験においては、コンクリート表面に塗仕上げが施された場合、仕上げ材によって表面からの透気が抑制されることが予測された。図-6 に示すとおり、小型試験体の促進中性化試験においては、緻密な塗仕上げ材はコンクリートの中性化進行が抑制されている。しかしながら、本実験における簡易透気試験の結果では、打放し試験体と各種の塗仕上げ試験体の測定値に大きな差異はみられない。このことに基づけば、塗仕上げを施したコンクリート面においてドリル削孔法による簡易透気試験を適用した場合、仕上材の影響を大きく受けない透気試験が実施できるものと考えられる。

ここで、コンクリート面に塗仕上げを施した状態は、図-9 に示す氏家らが提案している「シール削孔法」⁹⁾ に類似した状態であると考えられる。同法は、コンクリート表面をシールによって円形 (半径 5~20cm) に気密処理し、その中央に直径 1cm の孔を設けて透気試験により透気量を測定し、シール処理された領域の透気係数をダルシー則によって求める方法である。従って、各透気試験により求める指標値の違いはあるが、コンクリート表面を気密処理した状態と塗仕上げを施した状態が類似しているとの考えより、シール削孔法と同様に、ドリル削孔法では、試験において削孔内の減圧を停止した後、孔内が復圧する際の空気の流れが図-10 の予想図のようになるものと考えられる。すなわち、表面に塗仕上げが施されている場合であっても、その影響を大きく受けることなく削

孔内の領域におけるコンクリートの簡易透気速度を求めることが可能であると考える。

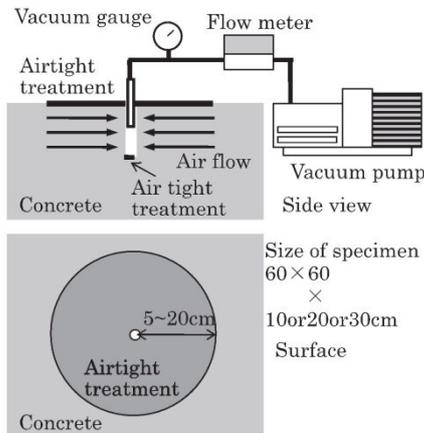


図-9 シール削孔法⁹⁾

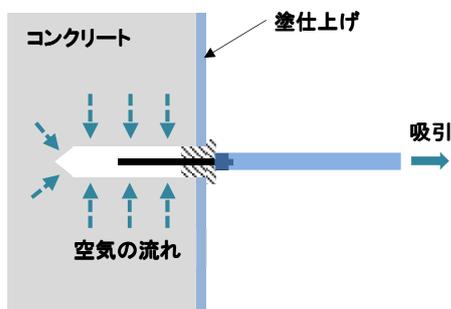


図-10 ドリル削孔内での空気の流れ（予想）

5. まとめ

塗仕上げが施された鉄筋コンクリート造建築物の部材や部位へのドリル PR 法の適用の可否を検討することを目的とした基礎的な実験により、次の知見が得られた。

- (1) 呼び強度を 3 水準として、3 種類の塗仕上げを施した小型および壁形試験体を用いて、ドリル削孔法による簡易透気試験を実施した結果、材齢 56 週時における打放し試験体と各塗仕上げを施した試験体の簡易透気速度を比較した場合、その差異は小さい。
- (2) 塗仕上げが施されたコンクリートの中性化抑制効果をドリル削孔法による簡易透気試験によって評価する場合、仕上材の気密性が高いものは、打放し部分との相対的な比較による評価は難しい。
- (3) ドリル削孔法による簡易透気試験は、表面の塗仕上げの種類やその有無に大きく影響されることなく、削

孔内の領域におけるコンクリートの簡易透気速度を求めることが可能であると考える。

なお、本実験はドリル PR 法の適用に関する基礎的な実験であったため、透気試験と比抵抗試験の適用について検討するに留まった。今後は、対象とする部材や部位を評価するための測定箇所数やその評価基準について検討することが課題となる。

参考文献

- 1) 下澤和幸, 永山勝, 今本啓一, 山崎順二, 二村誠二, 三橋博三: 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 646 号, pp.2145-2153, 2009.12
- 2) 笠井芳夫, 湯浅昇, 松井勇, 野中英: ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法, その 1~その 2, 日本建築学会学術講演梗概集, A-1, pp.699-702, 1999.
- 3) 武若耕司: コンクリートの非破壊検査方法 (原理と手法) - 鋼材腐食 -, 特集*コンクリートの非破壊検査/3.8, コンクリート工学, Vol.27 (No.3), pp.69-74, 1989.
- 4) JIS A 6909:2014: 建築用仕上塗材
- 5) RILEM TC116-PCD: Recommendations of TC 116-PCD, Tests for gas permeability of concrete. B. measurement of the gas permeability of concrete by the RILEM-CEMBUREAU method, Materials and Structures, Vol.32, pp.176-178, 1999.
- 6) JIS A 1153:2012: コンクリートの促進中性化試験方法
- 7) R.J.Torrent: A Two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol.25, No.150, pp.358-365, 1992.
- 8) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2015, p.207, 2015.
- 9) 氏家勲, 岡崎慎一郎, 中村翼: コンクリート構造物における現場透気試験方法の改善に関する検討, Cement Science and Concrete Technology, No.63, pp.189-195, 2009.