

論文 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

加藤 猛*¹・今本 啓一*²・清原 千鶴*³・山崎 順二*⁴

要旨：仕上付きコンクリートにおけるかぶりコンクリートまでの透気性評価の検討を行うために、複数の表層透気試験機を用いた。その結果、RILEM法は仕上材を含むコンクリートの透気性を評価していたのに対し、ダブルチャンバー法およびシングルチャンバー法については、主に仕上材の品質を評価していることが明らかとなった。そこで、仕上材付きコンクリートの透気性を評価するためにドリル削孔法を用い、仕上付きコンクリートの透気性評価のためダブルチャンバー法およびシングルチャンバー法と「ドリル削孔法」を組み合わせることを提案した。

キーワード：かぶりコンクリート、表層透気試験、仕上材、中性化、透気性、透気領域

1. はじめに

鉄筋コンクリート建築物の耐久性評価の判断材料の1つとして中性化がある¹⁾。中性化は、かぶりコンクリートを通して進行するため、原位置における品質評価が重要であり、その1つとして、表層透気試験がある。田中らによってコンクリート面において透気係数と中性化速度係数の間には高い相関があると示されている²⁾。しかし、既存する鉄筋コンクリート建築物のほとんどは仕上材が施されているため必ずしも十分ではない。仕上材は中性化抑制効果があり³⁾、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、劣化状態等によっても異なると考えられる。仕上材を有するコンクリートの透気係数においても同様である。仕上材による中性化抑制効果と透気係数の関係は不明瞭なことが多く、かぶりコンクリートまでの評価がされているとは限らない。

そこで本研究は、仕上付きコンクリートに対して各種表層透気試験を行い、透気試験時におけるコンクリートと仕上材内部の圧力を測定することによって透気領域の推定をした。さらに透気係数と中性化速度係数および中性化抵抗の関係より、仕上材を含めたコンクリートの透気性評価の検討を実験室レベルで行ったものである。

2. 表層透気試験

これまで様々な表層透気試験の開発・研究が行われてきた。各種表層透気試験機にはそれぞれの特徴があり、使用する状況に応じて、使い分けをする必要がある。ここでは仕上付きコンクリートの透気性評価を各種表層透気試験の結果より複合して評価することを試みる。

2.1 RILEM 法

透気性評価において、RILEM法(図-1)は海外でベンチマーク試験として位置づけられる。試験体はφ150mm、50mmのコンクリート試験体を用いてコンクリートをセルに格納し、周辺を気密にした状態で圧力(圧力設定を3パターン)を印加し、圧力が安定後に測定シリンダーが満たすまでの時間を測定する。圧力に応じた透気量から式(1)表示されるハーゲン・ポアズイユ則における透気係数を求める。

$$K = \frac{2 \cdot Q \cdot Pa \cdot L \cdot \eta}{A(P^2 - Pa^2)} \quad (1)$$

ここに、

K	： 透気係数	[m ²]
Q	： 透気量	[m ³ /sec]
P	： 印加圧力	[N/m ²]
Pa	： 大気圧	[N/m ²]
A	： 試験体断面積	[m ²]
L	： 試験体厚さ	[m]
η	： 気体の粘性	[Ns/m ²]

2.2 シングルチャンバー法

シングルチャンバー法(以下、SCM法)はチャンバー内を減圧したのち特定の気圧になるまでの時間を測定し、コンクリートの透気速度を式(2)により求める(図-2)。SCM法は試験時間が短く、簡便に測定できるが、床に対してはブリーディングによる影響によって、壁に対しては早期に脱型などによって形成される表層の粗な部分(Skin)に影響をうける⁴⁾。表面状態に測定結果が左右されることから、本研究では逆に仕上材の評価が可能な方法と考えた。

*1 東京理科大学 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科 教授 博士 (工学) (正会員)

*3 東京理科大学 工学部建築学科 嘱託補手 博士 (工学) (正会員)

*4 (株)浅沼組技術研究所 修士 (工学) (正会員)

$$\text{透気速度} = \frac{25.3 - 21.3(\text{kPa})}{\text{圧力が戻るまでの時間}(\text{sec})} \quad (2)$$

2.3 ダブルチャンバー法

ダブルチャンバー法(以下、DC 法)は、透気性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 重構造から成り立っている(図-3)。外部と内部の圧力を等しく制御することで、外部から内部のチャンバーに空気の流入を物理的に排除し、SCM 法などで懸念される Skin の影響を根本的に解決した試験方法である。内部チャンバー下からの栓流によるチャンバー内の経過時間と気圧変化量からかぶりコンクリートにおける透気係数および透気深さを式(3)、式(4)より求める。なお、内部・外部チャンバーをコントロールすることで内部チャンバーにおける一次方向の透気性を評価している。このため、測定部における空気流は RILEM 法における気体の流れと近いものと報告されている⁵⁾。

$$K = \left(\frac{V_c}{A}\right)^2 \cdot \frac{\mu}{2 \cdot \varepsilon \cdot P_a} \cdot \left(\frac{\ln \frac{P_a + \Delta P}{P_a - \Delta P}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_0}}\right) \quad (3)$$

$$L = \left(\frac{2 \cdot K t \cdot P_a \cdot t_f}{\varepsilon \cdot \mu}\right)^2 \quad (4)$$

ここに、

K	: 透気係数	[m ²]
L	: 透気深さ	[mm]
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 ~t _f 間の圧力増分	[N/m ²]
t _f	: 計測の終了時間	[s]
t ₀	: 測定開始時間(60 秒後)	[s]



図-1 RILEM 法

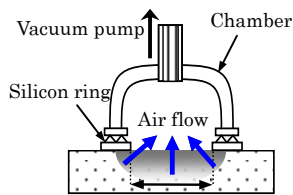


図-2 SCM 法

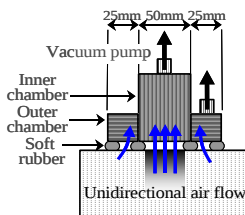


図-3 DC 法

3. 試験体概要

実験に用いるコンクリートの計画調合およびフレッシュ性状を表-1、使用材料を表-2に示す。コンクリートの圧縮強度は 26.4N/mm²であった。打込み後 3 日まで 20℃封緘養生を行った後、材齢 28 日まで恒温恒湿室(温度 20℃、相対湿度 60%)に気中養生し、材齢 28 日の時点で下地モルタルを施した。モルタルのフレッシュ性状を表-3に示す。下地モルタルは、透気係数の違いによる影響を検討するため、水セメント比 40 および 65%とし、水セメント比 65%においてはポリマーを 3 および 6%添加した。仕上材は比較的使用頻度の多い外装薄塗材 E(以下、Ri)、合成樹脂 EP(以下、Pe)、複層塗材 E(以下、F)の 3 種類とし、施工方法は統一して吹き付けとした。モルタルの材齢が 14 日(基材の材齢が 42 日の時点)で塗布を行った。

表-1 計画調合およびフレッシュ性状

W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	混和剤
65	50	19.5	5.5	172	265	903	925	2.65

表-2 使用材料

材料名	種類および物性
セメント	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³)
細骨材	大井川陸砂 (密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 2.07%)
粗骨材	青海産砕石 (密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 0.50%)
混和剤	AE 減水剤 (リグニンスルホン酸系)

表-3 モルタルフレッシュ性状

水セメント比(%)	フロー-0 打 (mm)	フロー-15 打 (mm)	空気量 (%)
40	94×95	108×113	4.7
65	114×112	228×227	0.8
65 ポリマー-3%	135×134	236×234	5.6
65 ポリマー-6%	163×176	249×244	4.5

4. 透気領域の検討

試験体一覧を表-4に示す。表-4に示す M40, M65, M65-Po3, M65-Ri, M65-F, および M65-Pe の記号に表される試験体を作製した。寸法は 150×150×200mm(仕上材塗布面 150×200mm)で図-4に示すように測定面から 5, 10, 20, 30mm の深さ方向に内径 φ1mm 外径 φ2mm のステンレスパイプを打設時に埋設させた。仕上材塗布後 14 日(基材の材齢が 56 日)まで恒温室に静置し、透気試験(DC 法, SCM 法)を行った。ステンレスパイプの先端に圧力センサーを取り付け、透気試験開始時から測定終了後コンクリート内の圧力が大気圧に戻るまでの圧力分布を測定することで透気領域の検討を行った。

圧力測定結果を図-5に示す。なお M40, M65-F については、測定時に 5mm の深さの位置で圧力変化がなか

表-4 試験体一覧

試験体 番号	仕上材の仕様				
	仕様	W/C	厚さ (mm)	養生 条件	ポリマー 添加量
M40	モルタル	40%	10	気中	-
M40-2 湿			10	2日湿布	-
M40-7 湿			10	7日湿布	-
M40-20			20	気中	-
M40-30			30	気中	-
M65	モルタル	65%	10	気中	-
M65-Po3			10	気中	3%
M65-Po6			10	気中	6%
M65-Ri	モルタル + リシン		10	気中	-
M65-F	モルタル + 複層		10	気中	-
M65-Pe	モルタル + ペイント		10	気中	-

表-5 透気係数と推定透気領域

	M40	M65-Po3	M65	M65-Ri	M65-Pe	M65-F
kT($\times 10^{-16} \text{m}^2$)	3735	63	165	1.1	3.8	<0.001
SCM(kPa/sec)	*	2.31	0.72	3.64	0.15	0.0075
L(mm)	1372	180	290	45	62	<5
推定透 気領域	5mm より 表層	30mm 以上	5~10 mm	5~10 mm	5~10 mm	5mm より 表層

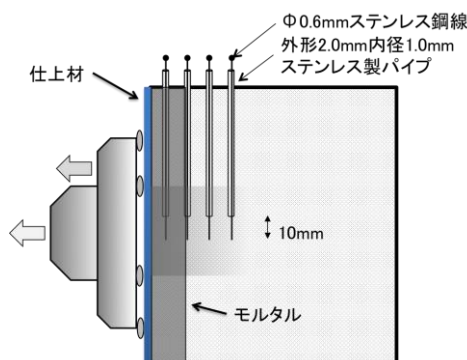


図-4 圧力分布概要

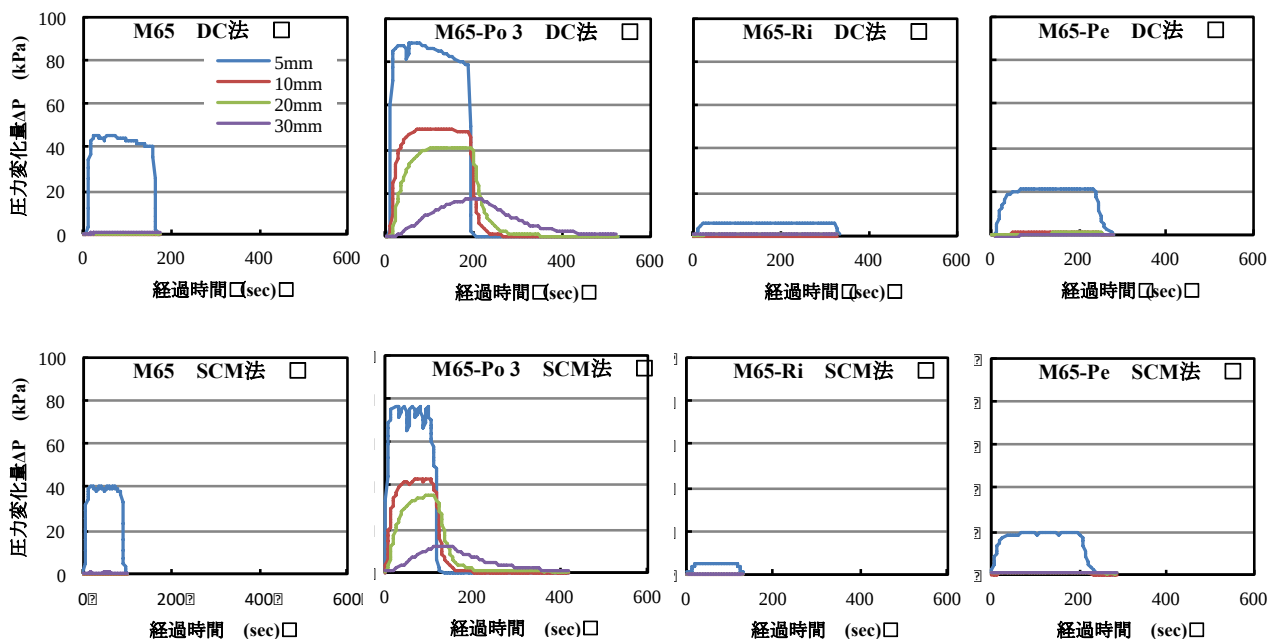


図-5 圧力分布

ったため結果を割愛した。図-5 よりいずれの試験体においても DC 法と SCM 法で圧力変化量は多少異なるが、同様の圧力分布を示した。透気試験時において得られた DC 法の透気係数(kT)と透気深さ(L), SCM 法で得られた透気速度(kPa/sec)また、図-5 から推定される透気領域を表-5 に示す。仕上材付きコンクリートの透気領域について、M65-Fを除き DC 法の式(4)により算出される透気深さ(L), と圧力分布により推定される透気領域は乖離する結果となった。仕上付きコンクリートの場合、ある一定の透気係数の大きさ以上になると DC 法であっても Skin の影響をうけることも予想されるがこの点については推定式の妥当性も含めて検討が必要であると考え。

M65-Po3 はコンクリート部まで透気しているが、それ以外の試験体はモルタルまで(表層から 5mm の位置), もしくはごく表層部までしか透気していないことが認められる。モルタルの水セメント比の違いや仕上材の違い等によって透気領域は異なるが、仕上付きコンクリートは仕上材部までが主たる評価領域と考えられる。

5. 各種表層透気試験

表-4 の全ての試験体に対して、試験体寸法が $\phi 150 \times 50 \text{mm}$ (コンクリートとモルタルの厚さの和)の試験体について DC 法, RILEM 法および SCM 法により測定を行った。DC 法および RILEM 法については、仕上材塗布前(基材の材齢は 28 日)および仕上材塗布後(基材の材齢は 56 日)に透気試験を行った。SCM 法についても仕上材塗布時に透気試験を行った。

5.1 実験結果

(1) 各種透気試験結果

各透気試験結果を図-6 に示す。コンクリートのみの透気試験結果は、全ての部材において、DC 法と RILEM 法による透気係数はほぼ同程度の値を示した。

仕上材塗布後の透気試験結果は RILEM 法において仕上材の種類によらず、どの試験体でもほぼ同程度の透気係数となり、またコンクリートのみの結果と比較しても透気係数に大きな変化はみられなかった。RILEM 法は、式(1)に示されるように透気係数を決定する要因の1つに試験体の厚さがある。仕上材の厚さに比べ、コンクリートの厚さが占める割合が大きく仕上材が塗布されていても主にコンクリート部の透気性を評価したためと考えられる。それに対して DC 法は仕上材の種類により透気係数が異なる。SCM 法についても同様であり、仕上材の影響を大きく受けていることを示唆する結果となった。なお、SCM 法の M65 については測定時に減圧しきらなかったため測定不可とし、図から割愛している。

(2) 各種透気試験との関係

仕上材塗布後の各種透気試験結果の関係を図-7 に示す。DC 法と SCM 法では両者の間には寄与率 0.71 の高い相関関係があった。仕上付きコンクリートの透気性を評価する際、DC 法においても SCM 法と同様に仕上材の影響を受けているが、その傾向は両者の方法において概ね同程度であると考えられる。

RILEM 法と DC 法および SCM 法の関係は相関関係が皆無であった。これは前述したように RILEM 法が主にコンクリート部を、DC 法および SCM 法が主に仕上材部の透気性の影響を受けているためと考える。

6. 促進中性化試験

各種表層透気試験で使用した試験体および試験体寸法 $100 \times 100 \times 200\text{mm}$ で同一種類の仕上材を施した試験体(打放し含む)を JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法に則り、中性化試験を行った。

6.1 実験結果

(1) 各種透気試験結果と中性化速度係数

各種透気試験結果と中性化速度係数との関係を図-8 に示す。各測定結果で中性化速度係数が高い点が1箇所あるが、これは打放し部の測定結果のためである。DC 法と SCM 法については透気係数が大きくなるにつれて中性化速度係数が高くなる傾向は示すが、透気係数と中性化速度係数との相関は必ずしも高くない。DC 法、SCM 法は仕上材部の透気性を評価しており、また促進中性化試験も仕上材の影響を受けるため、この点において定性的に両者は対応するものの、表層透気試験で評価する仕上材付きコンクリートの中性化深さを必ずしも精度よく反映していないための結果と考える。RILEM 法は透気係数が大きくなるにつれて中性化速度係数が高くなる傾

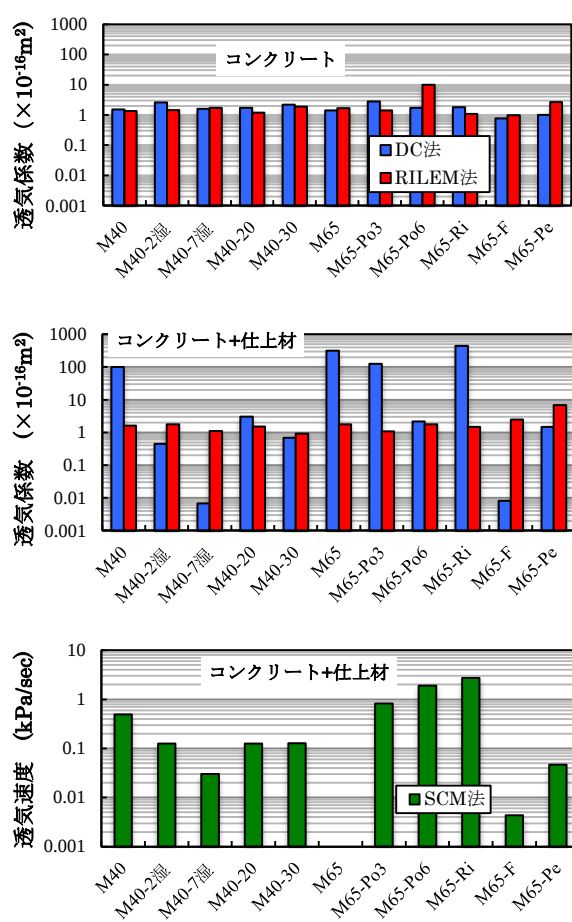


図-6 各種透気試験結果

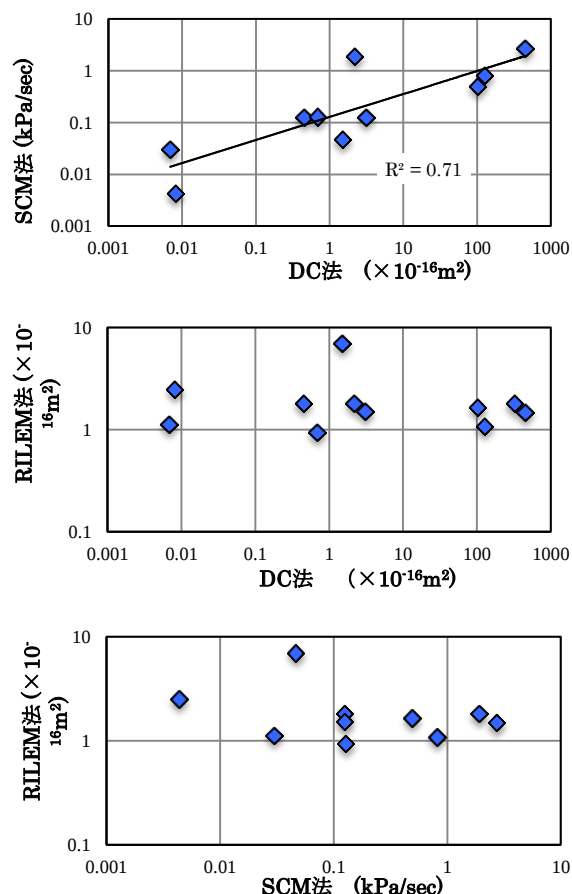


図-7 各透気試験との関係

向がみられなかったが、これは促進中性化試験そのものが仕上材の影響を大きく受けたためと考える。すなわち、仕上材付きコンクリートの中性化を評価するためにはコンクリート部および仕上材部それぞれの透気性を適切に評価する必要があるものと考えられる。

(2) 各種透気試験結果と中性化抵抗

中性化抵抗は馬場ら⁶⁾が提案した仕上材を施したコンクリートの中性化深さの式(5)から逆算したものを使用した。

$$X = A\sqrt{t + R^2} - R \quad (5)$$

ここに、

X	中性化深さ	[mm]
A	仕上材のないコンクリート の中性化速度係数	[mm/√year]
t	促進中性化期間	[week]
R	中性化抵抗	[√week]

各種透気試験結果と中性化抵抗の関係を図-9に示す。DC法およびSCM法は透気係数が小さくなるほど中性化抵抗が大きくなる傾向がみられた。両者の相関係数は中性化速度係数の時と比べて向上した。仕上材の厚さの要因を同一にすると(M40-20, M40-30を除く)DC法で寄与率0.77, SCM法で0.72と高くなった。DC法, SCM法の測定結果は、仕上付きコンクリートの中性化深さを予測するための手段として用いられるより、むしろ、仕上材による中性化抑制効果の程度を示していると考えられる。さらに仕上材の厚さが同一であれば精度よく示すことから、今後は仕上材の透気係数だけでなく仕上材の厚さを

考慮した評価が必要であると考えられる。

7 「表面法」と「ドリル削孔法」を組み合わせた評価の提案

これまでの実験結果より、仕上付きコンクリートにおいてDC法やSCM法のような「表面法」では、仕上材の品質を評価するものの、これのみでかぶりコンクリートの透気性を精度よく評価するには至らない。一方RILEM法はコンクリート部の透気性を評価することができるものの、実際の測定にあたってはコア抜きなどの大きな破壊作業が生じる。そこで、かぶりコンクリートのコンクリート部の透気性を評価するために、「削孔法」の位置づけにあるドリル削孔法を行い、「表面法」のDC法およびSCM法と「ドリル削孔法」の両者を組み合わせた評価の可能性を検討する。図-10に評価方法の概念を示す。図に示すように「表面法」で仕上材の評価をし、「ドリル削孔法」でコンクリート部を評価することで総合的な仕上付きコンクリートの透気性評価が可能であると考えられる。そのため、「ドリル削孔法」がコンクリートの評価が可能かを検討した。

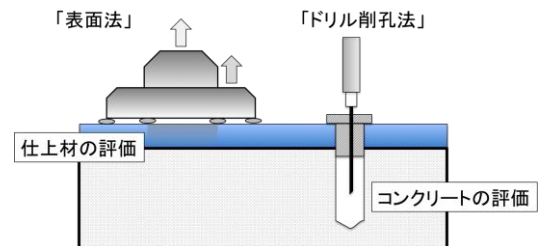


図-10 評価方法の概念

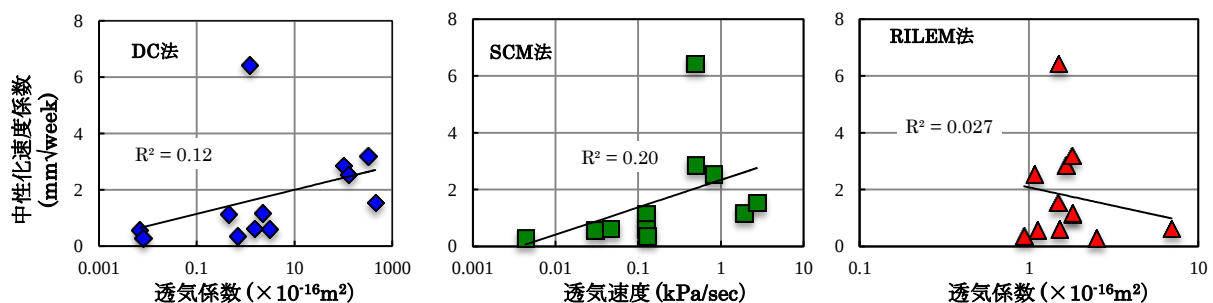


図-8 各種透気試験結果と中性化速度係数

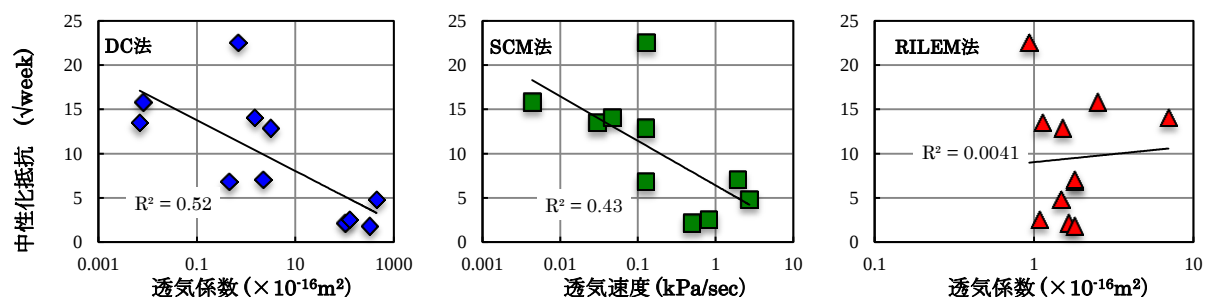


図-9 各種透気試験結果と中性化抵抗

透気領域の検討で使用した試験体を用いて行った。仕上材あり、なしでのコンクリートの透気性の比較ができるように、仕上塗布面と逆面の打放し面(以下、CON と表記)でも測定を行った。

7.1 ドリル削孔法

ドリル削孔法(以下:FIM法)を図-11に示す。FIM法は、試験位置に設けたドリル孔(直径10mm×深さ50mm)をシリコン栓にて密封し、孔内を減圧後、孔内部の圧力が所定の圧力に戻るまでに要する時間より簡易透気速度(kPa/sec)を求めるものでかぶりコンクリートまでの透気性を評価する。削孔することで、仕上材による影響を大きく受けることなく削孔内のコンクリート部における透気性の評価ができると示唆されている⁷⁾。算出式については式(2)と同様である。

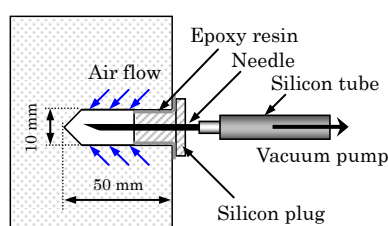


図-11 FIM法

7.2 実験結果

FIM法による測定結果を図-12に示す。M-40, M65-Fについてはドリルで削孔時モルタル部にひび割れが発生しており、測定時に空気漏れが確認されたため除外した。結果より打放し面と仕上面で透気速度の差は、前述のDC法およびSCM法と比較して相対的に小さかった。図-6よりDC法やSCM法は仕上材の影響を受けDC法は、 $0.001 \sim 1000 (\times 10^{-16} \text{m}^2)$ 、SCM法は $0.001 \sim 10 (\text{kPa/sec})$ の範囲で分布していることを考慮すれば、FIM法は $0.1 \sim 10 (\text{kPa/sec})$ の範囲で分布しているため相対的に仕上材による影響は少なく、コンクリート部の透気性を評価できているものとする。今後は「表面法」と「ドリル削孔法」を組み合わせた方法による中性化評価式の検討を行う予定である。

8. まとめ

仕上付きコンクリートの透気性に関して本実験により得られた知見を以下に示す。

- 1) DC法とSCM法の透気領域は同様であり、仕上材やモルタルの性状ごとに違うが、仕上部の領域を評価していると考えられる。
- 2) 仕上付きコンクリートに各種透気試験を行った時DC法とSCM法に高い相関がみられた。
- 3) 中性化評価する際、DC法やSCM法から得られる透気試験結果は中性化の予測するための値という

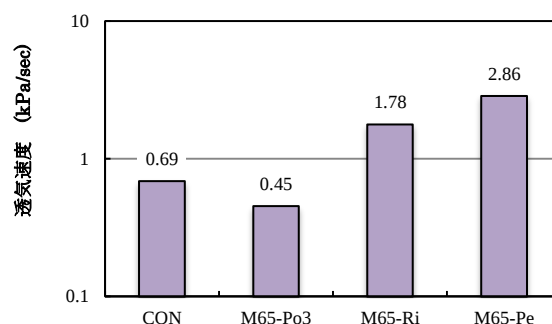


図-12 FIM法測定結果

よりも仕上材の中性化抑制効果の程度を示している。

- 4) FIM法は仕上材による影響はDC法およびSCM法と比べると相対的に小さかった。

謝辞

本論文に関して仕上材のご提供してくださったエスケー化研小寺努様、試験体作製や論文作成にご協力いただきました八洋コンサルタント田中章夫様にはここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学科：鉄筋コンクリート造構造物の耐久設計施工指針(案)・同解説，2004
- 2) 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.1539-1544, 2013.9
- 3) 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
- 4) Torrent, R., and Ebensperger, L., Studie über Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Überdeckungsbetons auf der Baustelle – Teil 1, p119, Office Fédéral des Routes, Suisse, Zürich, Januar 1993.
- 5) Schönli, K. and Hilsdorf, H.: Evaluation of the effectiveness of curing of concrete structure, ACI SP-100, Concrete Durability. Katharine and Bryant Mather Intern. Confer., Vol.1, pp.207-226, Detroit, ACI, 1987
- 6) 馬場明生ほか：各種表面層をもつコンクリートの中性化深さ推定式に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9, No.1, pp.333-338, 1987
- 7) 下澤和幸ほか：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