

論文 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

加藤 猛*¹・今本 啓一*²・清原 千鶴*³・山崎 順二*⁴

要旨：透気試験によって仕上材付きコンクリートの中性化速度の評価を行うためには仕上材およびかぶりコンクリートの透気性をそれぞれ適切に評価する必要がある。そこで仕上材付きコンクリートの透気性をダブルチャンバー法およびドリル削孔法により測定した。さらに両者の測定結果を複合させることを試みた。中性化速度評価手法の適用性を実験的に検討するために4種類の仕上材と3種類の基材コンクリートを組み合わせた試験体を作製した。検討の結果、ダブルチャンバー法およびドリル削孔法の透気抵抗性を複合させた手法による中性化速度評価の可能性と評価区分案を示した。

キーワード：仕上材、ダブルチャンバー法、ドリル削孔法、複合法、中性化速度係数、透気抵抗

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。材料そのものが耐久であっても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てしまう。よって耐久性を原位置で評価することが重要である。ダブルチャンバー法はかぶりコンクリートにおける粗密の程度を非破壊かつ原位置で評価する方法として用いられており、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されるようになってきた。

コンクリート面においてダブルチャンバー法から得られる透気係数と中性化速度係数には高い相関関係がある¹⁾とされているため、透気係数よりコンクリートの中性化進行予測をするといった用途として起用することが望まれる。仕上材が施されている際、仕上材は中性化抑制効果があり²⁾、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。仕上材付きコンクリートの透気係数においても同様であり、ここでの透気係数は主に仕上材の中性化抑制効果の評価をしていると考えられるため、ダブルチャンバー法単体でかぶりコンクリートの評価は難しい。しかし、仕上材付きコンクリートの中性化評価を行う上で仕上材の透気性とかぶりコンクリートの透気性の両者をそれぞれ適切に評価する必要がある。

そこで本研究では、4種類の仕上材と3種類の基材コンクリートを組み合わせた試験体に対しダブルチャンバー法に加え透気試験の中でも「削孔法」の位置付けにあ

るドリル削孔法を行った。そして両者の測定結果を複合させる手法を検討し、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方法について提案する。

2. 透気試験

2.1. 評価方法の概要

これまで様々な透気試験の開発・研究が行われている³⁾。ここでは透気試験の中でも「表面法」のダブルチャンバー法および「削孔法」のドリル削孔法を用いて仕上材付きコンクリートの測定を行った。この2つの透気試験を複合し評価する概念図⁴⁾を図-1に示す。

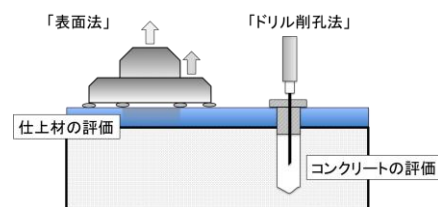


図-1 評価方法の概念⁴⁾

2.2 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-2)。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、シングルチャンバー法などで懸念されるSkinの影響⁵⁾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(1)、式(2)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

*1 東京理科大学大学院 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 嘱託助教 博士(工学) (正会員)

*4 (株)浅沼組技術研究所 修士(工学) (正会員)

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に近いものと報告されている⁶⁾。

$$K = \left(\frac{V_c}{A} \right)^2 \cdot \frac{\mu}{2 \cdot \varepsilon \cdot P_a} \cdot \left(\frac{\ln \frac{P_a + \Delta P}{P_a - \Delta P}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_0}} \right) \quad (1)$$

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

ここに、

K	透気係数	[$\times 10^{-16} \text{m}^2$]
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]

2.3 ドリル削孔法

ドリル削孔法(以下：FIM 法)を図-3 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 21.3kPa から 25.3kPa の圧力に戻るまでに要する時間より簡易透気速度(kPa/sec)を求めることで、かぶりコンクリート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(3)に示す。

$$\text{透気速度} = \frac{25.3 - 21.3(\text{kPa})}{\text{圧力が戻るまでの時間}(\text{sec})} \quad (3)$$

3. 試験体概要

実験に用いる基材コンクリートの計画調合を表-1、使用材料を表-2、フレッシュ性状および圧縮強度を表-3 に示す。基材コンクリートの水セメント比は 30, 60, および 100%の 3 種類とし、打込み後 3 日まで 20℃封蔵養生を行った後、材齢 28 日まで恒温恒湿室(温度 20℃, 相対湿度 60%)に気中養生した。仕上材は比較的使用頻度の多い複層塗材 E(以下、複層), 外装薄塗材 E(以下、リシン), 合成樹脂 EP(以下、ペイント), および薄付モルタル(以下、モルタル)の 4 種類とした。基材コンクリートの違いによる水分の影響を考慮し、基材コンクリートの材齢が 84 日(仕上材の塗布まで恒温恒湿室で静置)で仕上材の塗布を行った。試験体の寸法は 200×200×200mm とした。

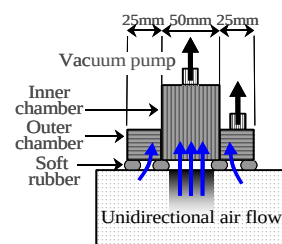


図-2 DC 法

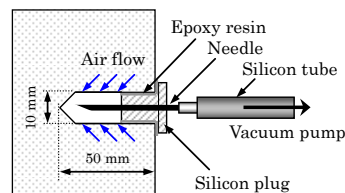


図-3 FIM 法

表-1 計画調合

W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				
		W	G	S	G	混和剤
30	46.8	175	583	720	840	7.00
60	48.8	180	300	857	922	3.90
100	54.5	200	200	973	835	2.00

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(C) (密度 3.16g/cm ³)
細骨材	大井川陸砂(S) (表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 2.07%)
粗骨材	青海産砕石(G) (表乾密度 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 フレッシュ性状および圧縮強度

W/C	空気量 (%)	温度 (°C)	スランプ (cm)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
30	7.0	24.5	12.2	44.6	27.1
60	3.6	24.7	17.8	30.2	25.4
100	4.4	24.3	18.5	9.5	14.2

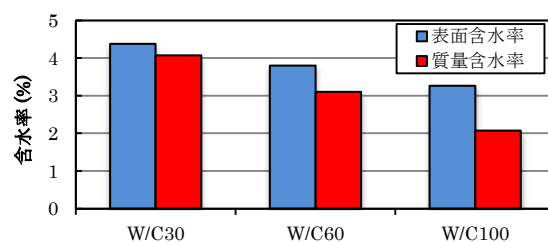


図-4 表面含水率および質量含水率

4. 実験結果

4.1 透気試験時の表面含水率および質量含水率

基材コンクリートの材齢 84 日時点において静電容量法による表面含水率および試験体を切断し、表面から 5cm まで試験体を 105℃の乾燥炉を用いて求めた質量含水率を図-4 に示す。水セメント比が大きいくほど表面含水率および質量含水率が小さくなっており、含水率が一番高い水セメント 30%においても SIA262⁸⁾が定める表面含水率 5.5%以下であったため透気試験時における水分の影響はほとんどないと考えられる。

4.2 透気試験結果

材齢 84 日時点における仕上材を塗布する前のコンクリート面に対して DC 法で測定した結果を図-5 に示す。同一の水セメント比であればほぼ同程度の透気係数を示し、水セメント比が大きくなるにつれて透気係数も大きくなる傾向がみられた。

仕上材塗布後に DC 法および FIM 法で測定した結果を図-6 および図-7 に示す。DC 法は図-5 に示す基材コンクリートのみとは異なり同一の水セメント比であっても仕上材の種類によって透気係数が異なることが確認された。FIM 法については同一の水セメント比であれば表面の仕上材の種類によらずほぼ同程度の透気速度を示し、打放しの結果と比較してもほぼ同程度であった。また、水セメント比が大きくなるにつれて透気速度が大きくなることから仕上材を介してもおおその基材コンクリートの透気性を評価していると考えられる。

4.3 促進中性化試験結果

試験体寸法 100×100×200mm 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、促進中性化試験を行った。

促進中性化試験結果により得られた中性化速度係数を図-8 に示す。仕上材が施されている試験体は、打放しの試験体と比べ中性化速度係数が小さいことから仕上材による中性化抑制効果が確認された。中でも複層仕上による中性化抑制効果は顕著であった。基材コンクリートの水セメント比 30% の試験体は基材コンクリート自体が中性化による抵抗が高かったため仕上材の種類によらずほとんど中性化の進行が認められなかった。

4.4 透気係数および透気速度と中性化速度係数との関係

DC 法および FIM 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を図-9 に示す。仕上材を塗布した試験体において DC 法と FIM 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増え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。

また、既往の研究⁹⁾¹⁰⁾で DC 法および FIM 法を行ったものを含めた結果を図-10 に示す(図中に既往の研究 I⁹⁾、既往の研究 II¹⁰⁾と示す)。既往の研究 II¹⁰⁾においては FIM 法での測定は行われていないが、1)打放し面において FIM 法と DC 法の間に高い相関関係がある¹¹⁾、2)FIM 法は仕上材を介しても打放しの結果とほぼ同程度である、3)既往の研究 II¹⁰⁾では基材コンクリートも DC 法で測定していることから、本実験および既往の研究 I⁹⁾により得られた DC 法と FIM 法の関係(図-11 に示す)の回帰式を用いて既往の研究 II¹⁰⁾における FIM 法の値とした。図-10 の結果からサンプル数を増やした結果、打放しの試験体において DC 法による透気係数および FIM 法による透

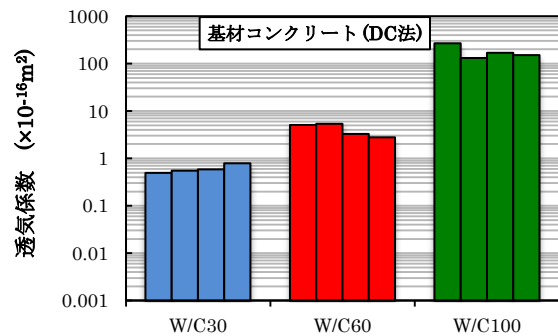


図-5 基材コンクリートの透気係数(DC 法)

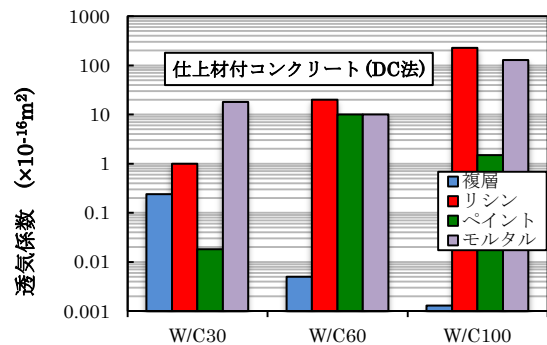


図-6 仕上材塗布後の透気係数(DC 法)

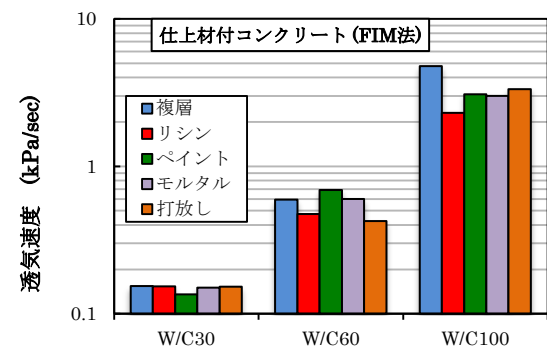


図-7 仕上材塗布後の透気速度(FIM 法)

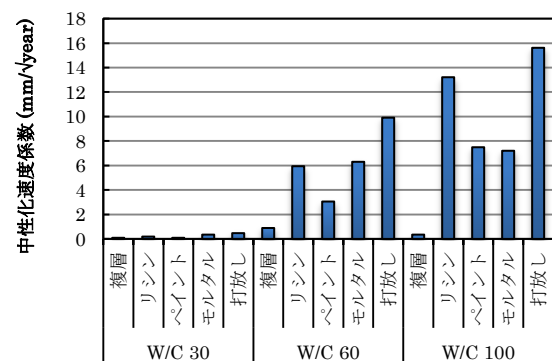


図-8 促進中性化試験結果

気速度と中性化速度係数の関係はある一定の相関が確認された。一方、仕上材を塗布した試験体において相関関係が高くないことが確認された。仕上材付きコンクリートの場合、DC 法による透気係数および FIM 法による透

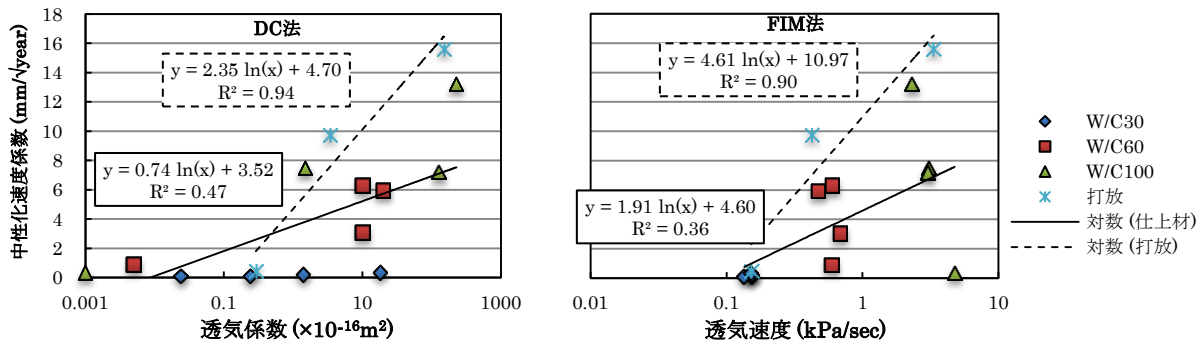


図-9 (a) DC 法の透気係数と中性化速度係数の関係 (b) FIM 法の透気速度と中性化速度係数の関係

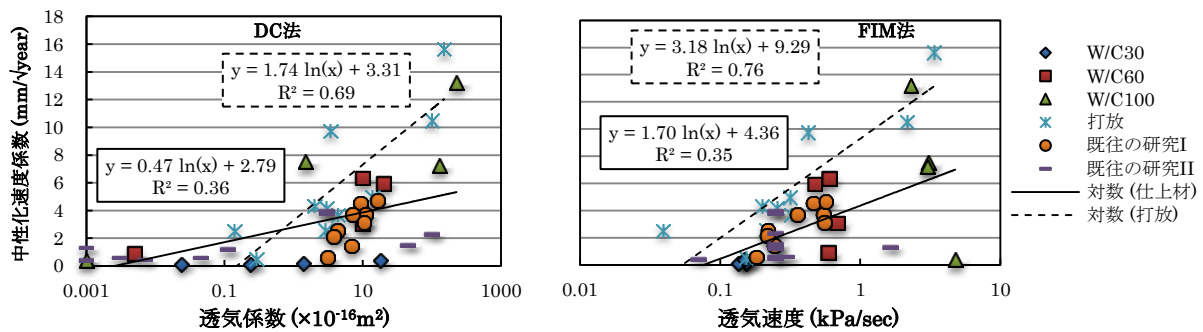


図-10 (a) DC 法の透気係数と中性化速度係数の関係 (b) FIM 法の透気速度と中性化速度係数の関係
(既往の研究 I⁹⁾および既往の研究 II¹⁰⁾を含む)

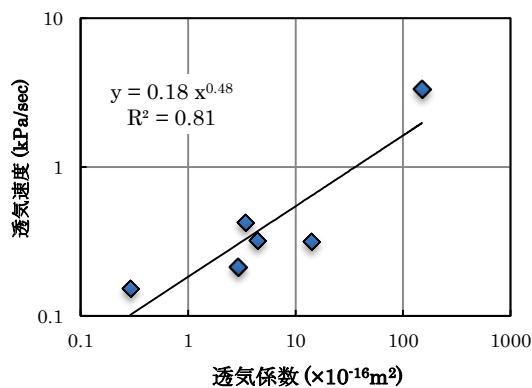


図-11 基材コンクリートにおける DC 法と FIM 法の関係 (既往の研究 I⁹⁾を含む)

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よそ 0.1 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、DC 法のみでは仕上材が中性化速度に及ぼす影響はある程度評価が可能であるが、仕上材付きのかぶりコンクリートの中性化速度の評価は難しく、また FIM 法のみではかぶりコンクリート部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結果となった。

5. 耐久性評価の案

5.1 複合法による中性化評価の提案

これまでの実験結果より、DC 法は測定結果に表面の仕上材の影響を受け、FIM 法では表面の仕上材の種類によらずおよそそのコンクリートの透気性を評価していることが確認された。しかし、透気試験単体では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。そこで、DC 法と FIM 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することを試みた。

5.2 複合法の検討

DC 法における透気係数および FIM 法における透気速度の逆数により仕上材付きコンクリートの透気抵抗性を表す。すなわち、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 $1/API$ の和を評価対象の透気抵抗 R と定義した。また、測定方法の違いにより重みづけを行い、各係数は中性化速度係数と式(4)により算出された透気抵抗の関係において最も相関係数の高い $\alpha=0.5$, $\beta=2$ とした。

$$R = \left(\frac{1}{kT} \right)^{\alpha} + \left(\frac{1}{API} \right)^{\beta} \quad (4)$$

ここに、

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

透気抵抗と中性化速度係数の関係を図-12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 $R^2=0.78$ の高い相関関係にあった。図-10と図-12を比較すると透気試験単体で評価することに比べ、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DC法とFIM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評価の可能性を示すものであると考える。

5.3 複合法による耐久性評価区分の検討

5.2の複合法による中性化速度評価式を用いて耐久性評価区分について検討を行う。中性化速度による耐久性評価区分が定められることにより、透気係数と透気速度で簡易に耐久性評価することを目的とする。検討するにあたり図-12に示す透気抵抗と中性化速度係数の近似線のばらつきを考慮するとともに、安全側に評価を行うため近似線から標準偏差 1.40 を加えた式(5)を中性化速度係数の予測式として用いることとした。

$$y = -1.67 \ln(R) + 8.26 \quad (5)$$

中性化が鉄筋に到達した時が供用年数とする考えのもと、JASS5¹²⁾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」、「超長期：200年」の各年数を供用年数として中性化が一般的なかぶり厚さである30mmに各計画供用期間で到達するとして中性化速度係数を $\sqrt{t}$ 則により算出した。また、算出された中性化速度係数を上記の中性化予測式で逆算して得られた透気抵抗を表-4に示す。式(4)で表される透気抵抗を透気係数と透気速度のマトリックスで示した一例を表-5に示す。表-4の各供用年数の透気抵抗を閾値として表-5の一例をもとに各供用年数の内30年、100年および200年における境界線を選定した結果を中性化速度による耐久性評価区分とし、横軸がDC法の透気係数、縦軸をFIM法の透気速度としたグラフ中に示す(図-13)。また、図-8の促進中性化試験の結果に対して表-4の各供用年数の中性化速度係数から評価区分を30年未満、30年以上100未満、および100年以上として図-13に実験結果を示す。実験結果の分布は概ね各供用年数の評価基準区分にあることが確認された。今後は実構造物の事例を蓄積し、引き続き検討を行う予定である。

5.4 仕上材付きコンクリートの耐久性評価区分(案)

図-14に前項で検討した仕上材付きコンクリートの耐久性評価区分(案)を示す。区分として等級Ⅰ：200年以上、等級Ⅱ：100年以上200年未満、等級Ⅲ：30年以上100年未満、および等級Ⅳ：30年未満の4等級を設けた。

例えば表層が緻密でDC法において透気係数が $0.1(\times 10^{-16} \text{m}^2)$ のように透気係数が小さく、比較的中性化が進行しないと予想される(図-10より)場合であっても、かぶ

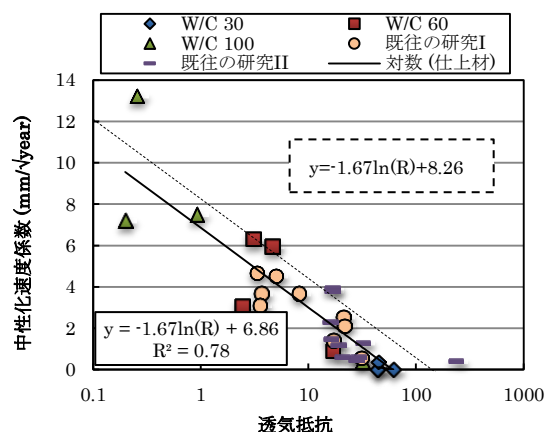


図-12 透気抵抗と中性化速度係数の関係

表-4 各供用年数の中性化速度係数と透気抵抗

供用年数	30年	65年	100年	200年
中性化速度係数(mm/√year)	5.48	3.72	3.00	2.12
透気抵抗	5.29	15.15	23.33	39.48

表-5 透気抵抗のマトリックス

		透気係数($\times 10^{-16} \text{m}^2$)						
		0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000
透気速度 (kPa/sec)	0.01	10031	10010	10003	10001	10000	10000	10000
	0.1	131.62	110.00	103.16	101.00	100.32	100.10	100.03
	1	32.62	11.00	4.16	2.00	1.32	1.10	1.03
	10	31.63	10.01	3.17	1.01	0.33	0.11	0.04

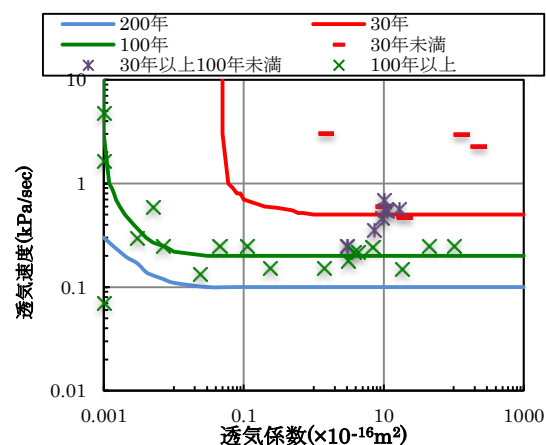


図-13 各供用年数の境界線および実験結果の分布

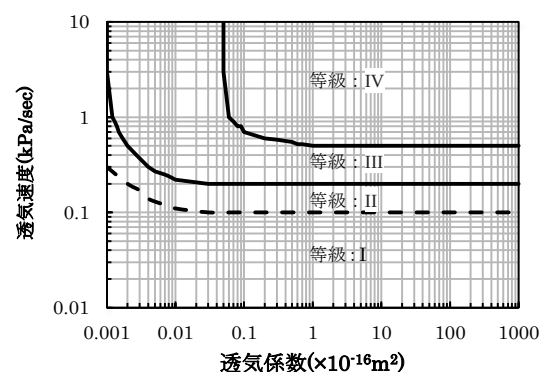


図-14 仕上材付きコンクリートの耐久性評価区分(案)

りコンクリートが粗で FIM 法の結果が 0.5(kPa/sec)よりも大きく、比較的中性化の進行が速いと予想されるような場合(図-10 より), 図-14 の評価では評価対象は等級 IV の区分にあり, 複合法による等級区分によって過大評価することを防ぐことが可能であると考えられる。また例えば, FIM 法による結果が 1(kPa/sec)程度にコンクリートが粗な場合であっても DC 法において 0.001~0.005($\times 10^{-16}\text{m}^2$)となるような仕上材を選定することにより, より等級の高い構造体とすることが可能になるものと思われる。しかし, 現状の案では仕上材の経年劣化等による耐久性の低下が見込まれていないが, 仕上材の定期的なメンテナンスにより, 仕上材の改修を行うことで仕上材の耐久性が維持されると考えられる。今後, 仕上材の経年劣化による影響, 仕上材の適切な改修時期の提案を含めさらに検討を進めたい。

6. まとめ

透気試験の複合法による仕上材付きコンクリートの中性化評価に関して, 本実験で得られた知見を以下に示す。

- 1) 仕上材付きコンクリートを DC 法および FIM 法で測定した時, DC 法は測定結果に仕上材の影響を受けるが, FIM 法は仕上材を介しても, おおよそかぶりコンクリートの透気性を評価していると考えられる。
- 2) 透気試験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ず, DC 法および FIM 法の透気抵抗性を複合させた透気抵抗で評価することで, 中性化速度係数との間に高い相関を得ることができた。
- 3) 中性化が鉄筋に到達した時が供用年数とする評価基準および本研究で提案する複合法にもとづき, 仕上材付きコンクリートの中性化評価区分の案を示した。今後さらにデータを集積して検討を進めたい。

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にはここに記して感謝の意を表します。

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.1539-1544, 2013.9
- 2) 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

- 3) 今本啓一: コンクリートの表層透気性試験方法の現状と課題, コンクリート工学, Vol.53, No.7, pp.606-613, 2015.7
- 4) 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
- 5) 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.
- 6) 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
- 7) 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
- 8) R. J. Torrent, F. Jacobs, Swiss Standard SIA 262:2003 A step towards performance-based specifications for durability, concrete in aggressive aqueous environments, performance, testing and modeling, 3-5 June 2009, Toulouse, France
- 9) 山崎順二, 今本啓一, 清原千鶴, 下澤和幸, 田中章夫, 本庄敬祐: 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 5. 模擬壁試験体における各種の透気試験の関係, 日本建築学会学術講演梗概集(関東), pp.367-368, 2015.9
- 10) 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
- 11) 田中章夫, 今本啓一, 湯浅昇, 下澤和幸, 山崎順二, 本庄敬祐, 加藤猛, 蔵重勲, 佐藤大輔, 野中英: 各種試験方法に関する共通試験その 2. RILEM-CEMBUREAU 法と各種透気試験の関係, 日本建築学会学術講演梗概集(福岡), pp.1239-1240, 2016.8
- 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 2009, pp.148-154, 2009